ISSN 2686-7877 (print)

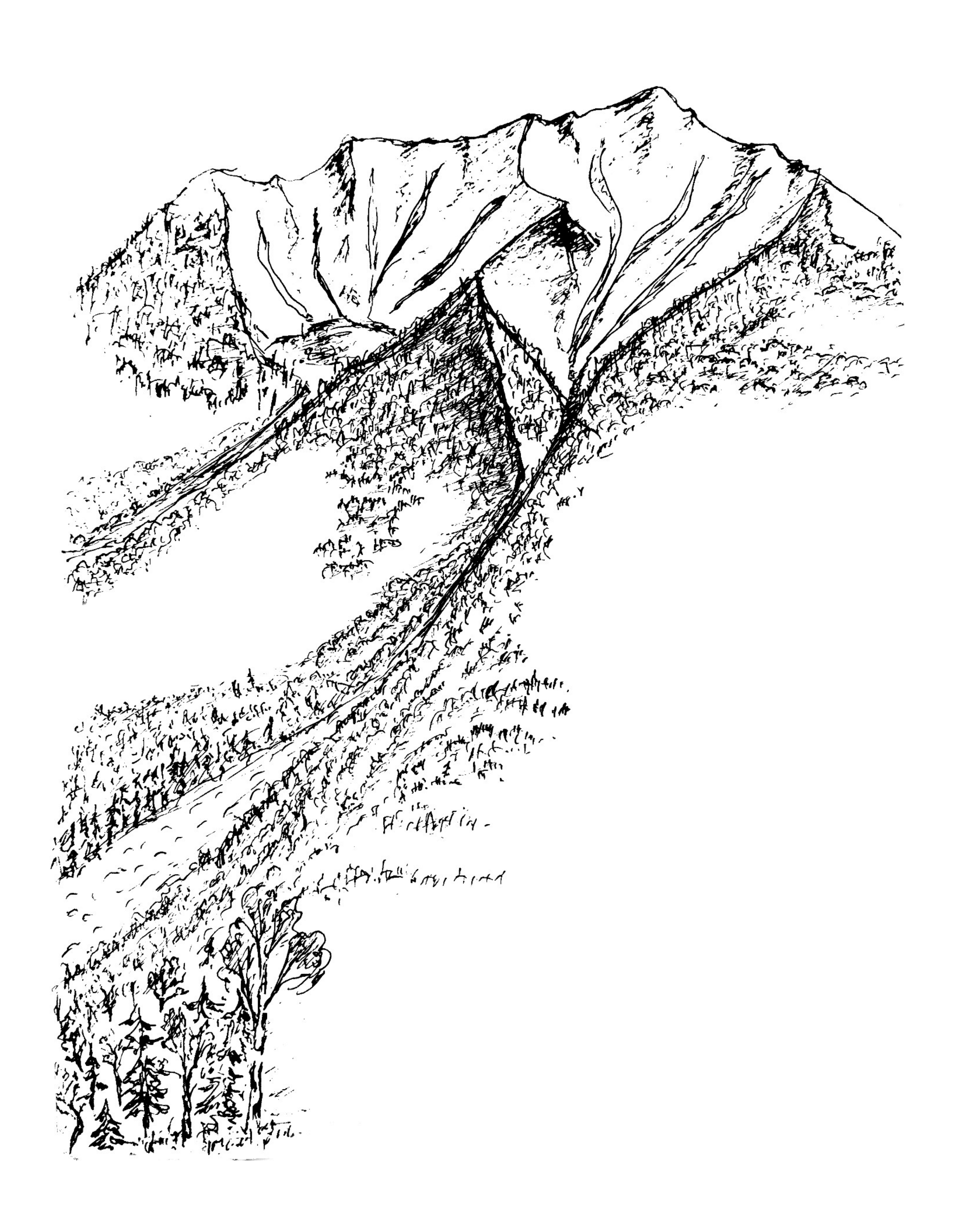
ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 1 Выпуск 1



**ГИДРОСФЕРА.
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ**

Том 1, Выпуск 1

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)

Учредители журнала

Научно-исследовательский центр «Геодинамика»
Научно-производственное объединение «Гидротехпроект»
Институт водных проблем Российской академии наук

Главный редактор

академик РАН **Г.И. Долгих,** Дальневосточное отделение Российской академии наук, заместитель председателя (г. Владивосток, Россия)

Заместители главного редактора

докт. техн. наук **А.Ю. Виноградов,** Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан,** Институт водных проблем Российской академии наук, директор (г. Москва, Россия)
канд. геол.-мин. наук, доц. **Н.А. Казаков,** Научно-исследовательский центр «Геодинамика», директор (г. Южно-Сахалинск, Россия)
докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто,** Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)

Ответственный секретарь

докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов,** Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия), телефон +7(812)313-83-48, e-mail: td@npogtp.ru.

**HYDROSPHERE.
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA
(GIDROSFERA.
OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)**

Volume 1, Issue 1

Issued 4 times per year

ISSN 2686-7877 (print)

Founders

Research Center «Geodynamics»
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences

Editor-In-Chief

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Vice-chairman of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia).

Deputy Editor-In-Chief

Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
Nikolay A. Kazakov, Associate Professor, Director of the Research Center «Geodynamics» (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).
Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University of Russia (St. Petersburg, Russia).
Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia).

Executive Editor

Viktor A. Obyazov, Doctor of Science, Technical director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia), tel. +7(812)313-83-48, e-mail: td@npogtp.ru.

Редакционный совет

академик РАН **Г.И. Долгих,** Дальневосточное отделение Российской академии наук, заместитель председателя (г. Владивосток, Россия)
докт. техн. наук **А.Ю. Виноградов,** Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, директор (г. Москва, Россия)
канд. геол.-мин. наук, доц. **Н.А. Казаков,** Научно-исследовательский центр «Геодинамика», директор (г. Южно-Сахалинск, Россия)
докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
проф. **Ф. Вэй,** Институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, заместитель директора (г. Чунцин, КНР)
проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Саппоро, Япония)
докт. **С. Фукс,** Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)

Редакционная коллегия

докт. биол. наук **В.Н. Безносов,** Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», главный научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук **В.П. Благовещенский,** Институт географии Республики Казахстан, заведующий лабораторией природных опасностей (г. Алматы, Казахстан)
докт. физ.-мат. наук **Ф.Ф. Брюхань,** Московский государственный строительный университет, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук, с.н.с. **Т.А. Виноградова,** Санкт-Петербургский государственный университет, доцент кафедры гидрологии суши (г. Санкт-Петербург, Россия)

Editorial Council

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Vice-chairman of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia).
Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
Nikolay A. Kazakov, Ph.D., Associate Professor, Director of the Research Center «Geodynamics» (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).
Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University (St. Petersburg, Russia).
Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia).
Viktor A. Objazov, Doctor of Science, Technical Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia).
Fangqiang Wei, Professor, Vice-Director of the Institute of Green and Intelligent Technologies, Chinese Academy of Sciences (Chongqing, China)
Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Sven Fuchs, Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria).

Editorial Board

Victor N. Beznosov, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia)
Viktor P. Blagovechshenskiy, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Natural Hazards, Institute of Geography of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Fedor F. Brukhan, Doctor of Science, professor of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia).
Sergey S. Chernomorets, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the Lomonosov Moscow State University, and President of the Debris Flow Association (Moscow, Russia).

член-корреспондент РАН **Е.Ж. Гармаев**, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, директор (г. Улан-Удэ, Россия)
докт. геогр. наук **Б.И. Гарцман,** Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий лабораторией гидрологии наводнений (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Г.Е. Глазырин,** Национальный университет Республики Узбекистан им. М. Улугбека, профессор (г. Ташкент, Узбекистан)
докт. физ.-мат. наук **В.К. Гусяков**, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией математического моделирования волн цунами (г. Новосибирск, Россия)
докт. **В. Джомелли,** лаборатория физической географии Французского Национального центра научных исследований, Университета Пантеон-Сорбонна и Университета Париж-Восток Кретей, директор по исследованиям (г. Париж, Франция)
проф. **К. де Йонг**, Страсбургский университет, заведующая кафедрой международных отношений факультета географии и регионального планирования (г. Страсбург, Франция)
докт. физ.-мат. наук **А.И. Зайцев,** Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией вычислительной гидромеханики и океанографии (г. Южно-Сахалинск, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Н.А. Калинин**, Пермский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы (г. Пермь, Россия)
академик РАН **Б.М. Кизяев,** Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, научный руководитель (г. Москва, Россия)
докт. геол.-мин. наук **А.М. Лехатинов,** МО «Тункинский район» Республики Бурятия, (г. Кырен, Россия)
канд. тех. наук **А.Е. Малашенко**, ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН, первый заместитель директора, главный конструктор (г. Южно-Сахалинск, Россия)

Pavel A. Chernous, Ph.D., Leading Researcher of the Laboratory of Exogenous Geodynamic Processes and Snow Cover of the Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).
Endon Zh. Garmaev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)
Boris I. Gartsman, Doctor of Science, Head of Flood Hydrology Department of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
Gleb E. Glaziryn, Professor, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (Tashkent, Uzbekistan).
Viacheslav K. Gusiakov, Doctor of Science, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Tsunami Waves (Novosibirsk, Russia)
Vincent Jomelli, Ph.D., Research Director of the Laboratory of Physical Geography of the French National Center for Scientific Research, the University Panthéon-Sorbonne and the University Paris-Est Créteil (Paris, France)
Carmen de Jong, Professor, Head of International Relations at the Faculty of Geography and Regional Planning (Strasbourg, France)
Nicolay A. Kalinin, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection of the Perm State University (Perm, Russia).
Boris M. Kizyaev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of Kostyakov All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering and Amelioration, (Moscow, Russia).
Anatoliy M. Lekhatinov, Doctor of Science, Municipality Tunkinsky District (Kyren, Russia).
Anatoliy Ye. Malashenko, Ph.D., deputy director of the Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).
Mikhail L. Markov, Associate Professor, acting Head of the Department of Forecasting Hydrological Processes and Experimental Research of the State Hydrological Institute (St. Petersburg, Russia).

канд. геогр. наук, доц. **М.Л. Марков**, Государственный гидрологический институт, и.о. заведующего отделом прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальных исследований (г. Санкт-Петербург, Россия)
академик НАН РК **А.Р. Медеу**, Институт географии Республики Казахстан, директор (г. Алматы, Казахстан)
докт. геогр. наук **А.В. Панин,** Московский государственный университет, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии (г. Москва, Россия)
академик НАН РК **И.В. Северский**, Институт географии Республики Казахстан, почётный директор; научный руководитель фундаментальных и прикладных исследований лаборатории гляциологии; вице-президент Международной гляциологической ассоциации (г. Алматы, Казахстан)
канд. геогр. наук, доцент **С.А. Сократов,** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, заместитель декана географического факультета по научной работе (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Е.А. Таланов,** Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, профессор кафедры метеорологии и гидрологии (г. Алматы, Казахстан)
академик РАН **А.К. Тулохонов,** Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, научный руководитель (г. Улан-Удэ, Россия)
канд. геогр. наук, доц. **С.С. Черноморец,** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории снежных лавин и селей географического факультета, президент Селевой ассоциации (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук **П.А. Черноус,** Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова (г. Южно-Сахалинск, Россия)
канд. тех. наук **С.В. Шварёв**, Институт географии Российской академии наук, заведующий лабораторией геоморфологии (г. Москва, Россия)
докт. **С. Ямагучи**, Научно-исследовательский центр снега и льда Национального исследовательского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям, старший научный сотрудник (г. Нагаока, Япония)

Akhmetkal R. Medeu, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Director of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan).
Andrey V. Panin, Doctor of Science, professor of the Department of Geomorphology and Paleogeography of Moscow State University (Moscow, Russia).
Igor V. Severskiy, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of fundamental and applied researches of the Department of Glaciology of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan).
Sergey V. Shvarev, Ph.D., Head of the Laboratory of Geomorphology of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
Sergey A. Sokratov, Ph.D. in Environmental & Earth Sci., Associate Professor, Deputy Dean for Research of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia).
Yevgeniy A. Talanov, Professor, Professor of the Meteorology and Hydrology Department Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan).
Arnold K. Tulokhonov, Academician of the Russian Academy of Sciences Scientific, Scientific Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia).
Tatiana A. Vinogradova, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Hydrology of St. Petersburg University (St. Petersburg, Russia).
Satoru Yamaguchi, Ph.D., Chief Researcher of the Snow and Ice Research Division of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (Nagaoka, Japan)
Andrei I. Zaitsev, Doctor of Science, Head of Laboratory of Computational Hydromechanics and Oceanography of Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Кадацкой Марии Михайловны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.
Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.
Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77 – 76914** от 11.10.2019

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Санкт-Петербург, 14-я линия В.О.
д. 97 пом. 3н.

Для почтовых отправлений: 199155 Санкт-Петербург, а/я 136, Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»

Тел. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru of technical editor **Mariya Kadatskaya**.

Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.
Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77 – 76914** from 11.10.2019

PUBLISHING:
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»

EDITORIAL ADDRESS:

St. Petersburg, 14th line of Vasilyevsky Island, 97 of. 3n.

For mail: 199155 St. Petersburg, PO Box 136 Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»

Tel. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



Глубокоуважаемые коллеги!

Мы открываем новый научный журнал, посвящённый исследованию Гидросферы и опасных природных процессов, так или иначе связанных с воздействием воды в ее различных фазовых состояниях.

В названии журнала заложена вся возможная широта тематики, касающаяся движения воды, ее режима, фазового состояния. Причем, это относится не только к состоянию воды, но и к тем процессам и явлениям, которые происходят в гидросфере и на границе разделов гидросфера-литосфера и гидросфера-атмосфера.

Тематика данного журнала значительно шире стандартных тем, обычно рассматриваемых в классических научных журналах, что крайне важно, так как на стыке некоторых казалось бы малосвязанных дисциплин могут быть получены колоссальные результаты. Около сорока лет назад было введено понятие «взаимодействие в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера»», которое сыграло огромную роль не только в изучении линейных и нелинейных процессов в данных геосферах, но и открыло много нового, связанного именно с их взаимодействием.

Полагаю, что в понятии ГИДРОСФЕРА заложено еще больше. Здесь всё начинается от микромира и взаимодействия на этом уровне и заканчивается макромиром с изучением линейных и нелинейных процессов в этом мире, с выходом на понятие «взаимодействие в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера».

Ну и, конечно, крайне важна тема опасных природных процессов и явлений в гидросфере – именно изучение этих процессов, закономерностей их возникновения и развития очень актуально, как для практики, так и для фундаментальной науки. Особенно важны вопросы краткосрочного прогноза данных процессов и явлений.

Думаю, что у журнала светлое будущее. Надеюсь, что он уверенно займёт подобающее место не только в международных наукометрических базах данных, но и, самое главное, в понимании нашего мира и в расширении кругозора читателей.

Главный редактор журнала,
д.ф.-м.н., профессор,
академик РАН Г.И. Долгих

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA



Dear colleagues!

We are starting a new scientific journal dedicated to the study of the hydrosphere and hazard natural processes, anyway associated with the impact of water in its various phase states.

The title of the journal contains all possible topics concerns to water movement, mode, and phase state. Moreover, this relates also to those processes and phenomena that occur in the hydrosphere and on the border between the hydrosphere-lithosphere and the hydrosphere-atmosphere.

It is extremely important that subjects of this journal is much wider than the standard topics usually considered in classical scientific journals, because there are great results at the junction of some outwardly unrelated disciplines can be obtained. The concept of "interaction in the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system" was introduced about forty years ago. This concept played a great part not only in the study of linear and nonlinear processes in these geospheres, but also discovered a lot of new, related specifically with their interaction.

I believe that the concept of HYDROSPHERE is even more. Here everything starts from the microworld and interaction at this level and ends with the macroworld with the study of linear and nonlinear processes in it, with the introduction of the concept of "interaction in the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system".

Well, and, of course, the topic of hazard natural processes and phenomena in the hydrosphere is extremely important – the study of these processes, the laws of their occurrence and development are very important both for practice and for fundamental science. The questions of short-term forecasting of these processes and phenomena are especially important.

I think the magazine will have a bright future. I hope that it will confidently take its appropriate place not only in scientific indexes, but also in understanding our world and outlooking extension of readers that is most importantly.

Editor-In-Chief,
Academician of the Russian Academy of Sciences Grigoriy I. Dolgikh

Обращение Учредителей журнала

Глубокоуважаемые авторы и читатели!

Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», Научно-исследовательский центр «Геодинамика», Институт водных проблем РАН представляют Вам новый журнал.

Сразу возникает вопрос – зачем? Разве мало сегодня специализированных журналов, публикующих материалы об исследовании процессов и явлений, происходящих в гидросфере? Это «Метеорология и Гидрология», «Ученые записки РГГМУ», «Водные ресурсы» и многие другие...

Постараемся аргументировать нашу позицию.

Человек с некоторых пор полагает себя хозяином природы, хотя жизнь постоянно доказывает ему обратное. Буквально ежедневно со всех концов света приходят известия о том, что где-то что-то размыто, разрушено, затоплено: катастрофические паводки и осадки, оползни и сели, лавины и ураганы... На фоне объективно усиливающихся экстремальных природных катаклизмов большинство печальных последствий происходит в результате ошибок, допущенных самим человеком: при проектировании и размещении объектов и сооружений в зонах развития опасных природных процессов, недоучёте или игнорировании характеристик опасных процессов и так далее.

Например, треть всех чрезвычайных ситуаций, произошедших в России за последние четверть века – наводнения. По людским и финансовым потерям они удерживают первое место среди природных катастроф. Наводнения возникают в связи с неспособностью речных русел по тем или иным причинам пропустить паводок. А пропускная способность русел чаще всего ограничена в местах рукотворных сужений русла – приуроченных к мостовым переходам или селитебной застройке. Виной тому – целый комплекс причин.

Мы выделяем три проблемы, ведущие, в числе прочих, к нарастанию угроз водной безопасности страны.

Первая – катастрофическая потеря квалифицированных кадров в области наук о Земле: как в исследовательской сфере, так и в производственной. Недавно нами был проведен массовый опрос среди студентов старших курсов одного из Московских Университетов. Вопрос был следующий: сколько литров в кубическом метре. Ответа мы не получили. К сожалению, часть преподавательского состава тоже затруднилась в ответе.

Вторая – невзирая на высокое качество строительства инфраструктурных и промышленных объектов в 50-70 годы XX века, время их эксплуатации подходит к концу.

Третья – отсутствие должного контроля за эксплуатирующими различные технические объекты организациями.

Отчасти это происходит потому, что политику ведомств, управляющих водной отраслью, стали определять люди, не имеющие представления о той области, которой они занимаются. С другой стороны, сужается пространство дискуссии – общественной, научной, межведомственной – о сложившейся ситуации.

В результате, возник вакуум, который необходимо немедленно заполнять, пока еще остались неравнодушные и профессионально подготовленные люди. Как только мы услышали о возможности создания новой профессиональной дискуссионной площадки, мы горячо и всесторонне поддержали предложенную идею. Таким образом и возник предлагаемый Вашему вниманию журнал.

Сложившееся разобщение в научном и профессиональном сообществе нужно попытаться переломить. В противном случае, в результате принятия неправильных решений, ошибочного управления проектами в ближайшие годы мы можем вступить в непрерывную череду аварий и катастроф.

Вместе с тем, система наших знаний о процессах и явлениях, происходящих в гидросфере Земли, всё ещё далеко не полная. По мере их познания возникает всё больше и больше вопросов, ответов на которые мы пока не знаем – или же эти ответы не вписываются в принятые научные парадигмы.

В науках о Земле все серьёзные научные открытия происходят на стыках научных дисциплин – и по этой причине, мы надеемся на то, что наш журнал станет междисциплинарным.

Мы надеемся также на то, что наш журнал станет не просто очередным периодическим научным изданием, а открытым дискуссионным клубом, в котором право высказать своё мнение по актуальным вопросам гидрологической науки имеет каждый, вне зависимости от стажа работы в гидрологической и смежных науках, учёных званий, степеней и веса в научном сообществе. Единственное ограничение – высокий профессиональный уровень дискуссии, поддержание которого станет одной из основных задач Издателя и редакционной коллегии журнала. Эволюция гидросферы Земли и её фундаментальные проблемы, опасные процессы и явления в гидросфере, методология и методика гидрологических исследований – вот основные темы научных дискуссий, которые, как мы надеемся, развернутся на страницах нашего издания. Впрочем, только ими мы ограничиваться не собираемся.

Высказывайте своё мнение, как бы ни казалось оно спорным, доказывайте его, дискутируйте с оппонентами на наших страницах — мы готовы это только приветствовать и всеми силами поддерживать. В нашем журнале любое аргументированное мнение имеет право на публичное существование. И мы надеемся, что наш журнал станет ещё одним кирпичиком в монументальном дворце науки о Гидросфере – одной из важнейших частей мироздания.

До встречи на страницах журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»!

А.Ю. Виноградов   А.Н. Гельфан   Н.А. Казаков   Д.А. Субетто   В.А. Обязов

Message from the Founders of the journal

Dear authors and readers!

The Scientific and Production Association Gidrotehproekt, the Research Center Geodynamics, and the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences present you a new journal.

The question immediately arises – for what? Are there few specialized magazines today that publish materials on the study of processes and phenomena occurring in the hydrosphere? These are "Meteorology and Hydrology", "Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University", "Water resources" and many others ...

We will try to argue our position.

The human considers for some time himself as the owner of nature, although this world always evidences otherwise to him. Practically every day, from all over the world, news come about that somewhere something is blurred, destroyed, flooded: disastrous floods and precipitation, landslides and mudflows, avalanches and hurricanes... Against the background of objectively intensifying extreme natural disasters, most sad consequences occur as a result of mistakes made by the people: while designing and placing objects and structures in the zones of development of hazard natural processes, underestimating or ignoring the characteristics of hazard processes, etc.

For example, one third of all emergency situations that have occurred in Russia over the past quarter century are floods. They hold first place among natural disasters by human and financial losses. Floods occur due to the failure by watercourses to miss the high water for any reason. But the capacity of the watercourses is most often limited in man-made narrowing places of the channel - confined to bridge crossings or residential development. The faults of this is a whole complex of reasons.

We distinguish three problems that lead, among others, to an increase in threats to the country's water safety.

The first problem is the catastrophic loss of qualified personnel in earth sciences: both in the research and industrial sphere. Recently, we conducted a mass interview among students of Moscow University. The question was: «How many liters are in cubic meter». We did not receive any right answer. Unfortunately, part of the lecturer staff also found it difficult to answer.

The second reason – the life time of infrastructurial and industrial facilities which was high quality constructed in the 50-70 years of the XX century is ending

The third reason is the lack of due control by organizations operating various technical facilities.

It is partly because the policies of departments controlling the water industry are currently determined by people who have no concept about this area. Contrariwise, the space of discussion (public, scientific, interagency) about the current situation is narrowing.

As a result, a vacuum has arisen. It must be filled immediately, while there are concerned and professionalled people. As soon as we heard about the possibility of creating a new professional discussion platform, we warmly and comprehensively supported the proposed idea. Thus, this journal arose for your attention

The existing dissociation in the scientific and professional community should be tried to break. Otherwise, as a result of making the wrong decisions, mistaken project management in the coming years, we can enter into a continuous series of accidents and disasters.

At the same time, the system of our knowledge about the processes and phenomena occurring in the hydrosphere is still far from complete. As they become known, more and more questions arise, the answers to which we do not yet know - or these answers do not fit into the accepted scientific paradigms.

In earth sciences, all serious scientific discoveries occur at the intersections of scientific disciplines - and for this reason, we hope that our journal will become interdisciplinary.

We also hope that our journal will become not just another periodocal scientific issue, but an open discussion club in which everyone has the right to express their opinion on actual question of hydrological science, no matter of work experience in hydrological and related sciences, academic ranks, degrees and weights in the scientific community. The only limitation is the high professional level of discussion, the maintenance of which will become one of the main tasks of the Publisher and the Editorial Board of this journal. The evolution of the Earth's hydrosphere and its fundamental problems, hazard processes and phenomena in the hydrosphere, the methodology and methods of hydrological research are the main topics of scientific discussions that, we hope, will unfold on the pages of our journal. However, we are not going to limit ourselves to them only.

We invite you to express your opinion, no matter how controversial it may seem, prove it, discuss with opponents on our pages - we are ready to compliment and to support it. In our journal, any argued opinion has the right to public existence. And we hope that our journal will become another brick in the monumental palace of science Hydrosphere - one of the most important parts of the universe.

See you on the pages of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena”!

Alexey Yu. Vinogradov Alexander N. Gelfan Nikolay A. Kazakov Dmitriy A. Subetto Viktor A. Objazov

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ГИДРОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

HAZARDOUS PROCESSES AND PHENOMENA IN THE HYDROSPHERE OF THE EARTH

УДК 624.131.544: 551.311.2: 627.141.1

МАССОВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СЕЛЕЙ В НИЗКОГОРЬЕ О. САХАЛИН: УСЛОВИЯ И ПОВТОРЯЕМОСТЬ

Н.А. Казаков[1,2]

[1]ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

[2]НИЦ «Геодинамика», Южно-Сахалинск, Россия

cdsmd@yandex.ru

Аннотация. В низкогорье Южного и Среднего Сахалина активно развиваются селевые процессы. Формируются селевые потоки всех типов: грязекаменные, грязевые, наносоводные, водоснежные. Средние объемы грязекаменных селей: 500 – 10 000 м^3, максимальные – более 500 000 м^3. В июле – октябре с периодичностью от 1 раза в 3-5 лет до 1 раза в 10-12 лет повторяются периоды массового селеобразования продолжительностью от 1 до 3-5 суток, связанные с выходом глубоких циклонов (50 мм и более осадков за

MASS FORMATION OF DEBRIS-FLOWS IN THE LOW MOUNTAINS OF SAKHALIN ISLAND: CONDITIONS AND REPEATABILITY

Nikolay A. Kazakov[1,2]

[1]Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

[2]Research Center «Geodinamics», Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

cdsmd@yandex.ru

Abstract. In the debris-flows basins of the Southern and Middle part of Sakhalin island are formed debris-flows, mudflows, slush-flow and suspended stream. Average volumes of debris-flows: 500 - 10 000 m^3, maximum-more than 500 000 m^3. In July-October, periods of mass formation of debris-flows and mudflows are repeated from 1 time in 3-5 years to 1 time in 10-12 years. These periods last from 1 to 3-5 days. These periods occur during deep cyclones (when more than 50 mm of precipitation falls per day). During these periods some hundreds of debris-flows

Kazakov N.A. Mass formation of debris-flows in the low mountains of Sakhalin island: conditions and repeatability. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 14-30 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.002

сутки), когда в большинстве селевых бассейнов формируются сотни грязевых, грязекаменных и наносоводных селей. Например, во время прохождения тайфунов «Оджин» и «Филлис» 3-5 августа 1981 г. на юго-западном побережье о. Сахалин на участке длиной 55 км сошло 154 селя максимальным объёмом до 12 тыс. м^3, а на юго-восточном побережье (на участке длиной 30 км) сошло 55 селей максимальным объёмом до 35 тыс. м^3. Периоды массового селеобразования на Южном Сахалине отмечались в 1947, 1951,1964, 1965, 1970, 1972, 1978, 1981, 1992, 1993, 2000, 2002, 2003, 2009, 2010, 2011, 2013, 2016, 2018 г.г. Высокая интенсивность проявления на о. Сахалине селевых процессов обусловлена большой глубиной расчленения рельефа (500 – 1000 м), большими уклонами селевых русел (35°-50°), сильными атмосферными осадками (суточный максимум осадков – 230 мм, часовой – более 50 мм) и геологическим строением селевых бассейнов: молодые горные породы, слабосцементированные, легко размываемые и размокаемые (алевролиты, аргиллиты, песчаники), насыщающие селевой поток глинистыми фракциями, в сочетании с прочными интрузивными, вулканогенными и метаморфическими породами (диоритовые порфириты, андезиты, диориты, дациты, зеленокаменные сланцы, серпентиниты), образующими валунно-глыбовую фракцию селей.

and mudflows form in most mud basins. For example, during the passage of typhoons "Ojin" and "Phyllis" on August 3-5, 1981 on the South-Western coast of Sakhalin Island, 154 debris-flows and mudflows with a volume of up to 12 thousand m3 descended on a section 55 km long. At the same time, 55 debris-flows and mudflows with a volume of up to 35 thousand m^3 descended on the South-Eastern coast of Sakhalin Island (on a section 30 km long). Periods of mass formation of debris-flows and mudflows on Southern Sakhalin were noted in 1947, 1951, 1964, 1965, 1970, 1972, 1978, 1981, 1992, 1993, 2000, 2002, 2003, 2009, 2010, 2011, 2013, 2016, 2018. The high intensity of the manifestation of debris-flows and mudflows processes on Sakhalin Island is due to the following factors: a large depth of relief (500 – 1000 m), large slopes of debris-flows and mudflows channels (35°-50°), strong precipitation (daily maximum precipitation – 230 mm, hourly – more than 50 mm), as well as the geological structure of debris-flows and mudflows basins: young rocks, weakly cemented, easily eroded and soaked (siltstones, mudstones, sandstones) saturating the debris-flows with clay fractions; strong Intrusive, volcanogenic and metamorphic rocks (diorite porphyrites, andesites, diorites, dacites, Greenstone shales, serpentinites), form a boulder-block fraction of mudflows.

Ключевые слова: период массового селеобразования; грязекаменный сель; грязевой сель; наносоводный сель; тайфун

Keywords: mass formation of debris-flows; debris-flow; mudflow; suspended stream; deep cyclones.

Введение

Селевые процессы широко распространены в низкогорье о. Сахалина. В селевых бассейнах Южного и Среднего Сахалина формируются селевые потоки всех типов: грязекаменные, грязевые, наносоводные, водоснежные. Средние объемы грязекаменных селей составляют 500 – 10 000 м^3, максимальные – превышают 500 000 м^3 [Казаков, Жукова, 1988; Казаков, 2000; Казаков, Жируев, 2004, 2006].

Частота формирования селей максимальных объёмов зависит от типа и состава горных пород потенциальных селевых массивов и морфометрических характеристик селевых бассейнов и в среднем составляет около 25 лет.

Поражаемость территории о. Сахалина селевыми процессами достигает 50%. Дальность выброса грязекаменных селей достигает 10 – 15 км, высота селевых волн – 12 м (р. Пулька, 1981 г).

Селеопасна территория 30 населенных пунктов Сахалинской области, в которых насчитывается 357 селевых бассейнов, более 300 км автомобильных и железных дорог, около 100 км нефтегазопровода «Сахалин-2».

В селеопасных зонах проживает более 100 000 человек.

Ущерб от селевых потоков на о. Сахалине выражается, в основном, в завалах и разрушении транспортных магистралей селевыми отложениями, реже – в повреждении и разрушении зданий и сооружений [Казакова, 2014].

Повторяемость грязевых и грязекаменных селей на Южном и Среднем Сахалине составляет (в зависимости от геологического строения селевого бассейна и состава горных пород в селевых очагах) один раз в 3 – 20 лет.

Однако в разных районах о. Сахалин (в зависимости от геологического и геоморфологического строения, режима и интенсивности атмосферных осадков) с периодичностью от 1 раза в 3-5 лет до 1 раза в 10-12 лет повторяются периоды массового селеобразования, во время которых формируются сотни грязевых, грязекаменных и наносоводных селей.

Именно в периоды массового формирования селей во время выпадения сильных осадков на Южном и Среднем Сахалине происходят многочисленные разрушения транспортных магистралей, объектов и сооружений и населённых пунктов [Казакова, 2014].

При этом зачастую косвенный экономический ущерб от селевых процессов (прекращение транспортного сообщения, подачи электроэнергии и так далее) во много раз превышает стоимость прямого ущерба от повреждения и разрушения дорожного полотна селевыми потоками.

В связи с этим, исследование вопроса о причинах и повторяемости периодов массового селеформирования представляется очень важным.

Методы исследования

Исследования селевых процессов на Южном Сахалине регулярно проводились в 1978-1985 г.г. (Сахалинское УГМС, Н.А. Казаков) и в 1985-2007 г.г. (Сахалинская геологоразведочная экспедиция, Г.В. Полунин, Т.Я. Герасимова), эпизодически в 1996-2019 г.г. (Сахалинское отделение МАНПО, НИЦ «Геодинамика», лаборатория лавинных и селевых процессов СФ ДВГИ ДВО РАН, лаборатория экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова СКБ САМИ ДВО РАН).

Наиболее полно селевые процессы были исследованы в 1978-1980 г.г. при подготовке «Кадастра селей СССР»[1] (Сахалинское УГМС, Н.А. Казаков) и в 1981 г. при обследовании селей, сошедших во время прохождения тайфуна «Филлис» (Н.А. Казаков, Г.В. Полунин [Казаков, Жукова, 1988; Казаков, 2000; Полунин, 1983, 1989; Полунин, Бузлаев, 1984]).

В 1978-1985 г.г. Н.А. Казаковым были организованы стационары в двух селевых бассейнах на юго-западном и юго-восточном побережьях о. Сахалина, в которых проводились исследования геологического строения селевых бассейнов и вызывались искусственные сели малого объема для исследования их динамических характеристик [Казаков, Жукова, 1988].

После периодов массового схода селей исследовались следующие характеристики сошедших селей: объем, ширина фронта и зоны аккумуляции селей, плотность селевого потока и селевых отложений, глубина селевого потока (высший селевой горизонт, который определялся по отметкам селя на древесных стволах и бортах селевого русла), структурно-реологические и другие характеристики селевых потоков и потенциальных селевых массивов.

[1] Кадастр селей СССР. Том 18. Дальний Восток, Сахалин и Курильские острова. Выпуск 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
Kadastr selej SSSR tom 18 Dal'nij Vostok, Sahalin i Kuril'skie ostrova. Vypusk 4. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986 (In Russian).

Количество выпавших атмосферных осадков определялось по данным ближайших к району селеобразования гидрометеорологических станций и постов и по данным суммарных осадкомеров, установленных в горах.

Результаты и их обсуждение

Высокая интенсивность проявления на о. Сахалине селевых процессов обусловлена сочетанием следующих факторов селеобразования:

- большая глубина расчленения рельефа (500 – 1000 м);
- большие уклоны селевых очагов и селевых русел (35°-50°);
- сильные осадки: за трое суток дождя в горах – более 1000 мм; суточный максимум осадков – 230 мм[2], часовой – более 50 мм; за 47 часов непрерывного дождя – 312 мм;
- геологическим строением селевых бассейнов: молодые горные породы, слабосцементированные, легко размываемые и размокаемые (алевролиты, аргиллиты, песчаники), насыщающие селевой поток глинистыми фракциями в сочетании с прочными интрузивными, вулканогенными и метаморфическими породами (диоритовые порфириты, андезиты, диориты, дациты, зеленокаменные сланцы, серпентиниты) обеспечивающими валунно-глыбовую составляющую селевых потоков (рисунки 1-3);
- большим количеством селевых бассейнов: так, на береговых уступах в некоторых районах Южного Сахалина число селевых бассейнов на 1 км побережья достигает 6-7 (рисунки 4, 5).

Самая высокая частота селеобразования на о. Сахалине отмечается в селевых геосистемах на береговых уступах и на морских аккумулятивных и абразионно-денудационных террасах, где формируются грязекаменные, грязевые, наносоводные и водоснежные сели объемом от 0,5 до 50 тысяч м^3 [Казаков, Жукова, 1988; Казаков, 2000; Казаков, Жируев, 2004, 2006; Рыбальченко, 2012a, 2012b, 2013; Рыбальченко, Верховов, 2017].

Плотность грязевых и грязекаменных селей составляет 1700 - 2100 кг/м^3, скорость – 9-11 м/с, селевые расходы могут превышать 50 м^3/с.

---

[2] *Научно-прикладной справочник по климату СССР*. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 34. Сахалинская область. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 353 с.
Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Vypusk 34. Sakhalinskaya oblast'. [*Scientific-applied reference on the climate of the USSR*. Series 3. Perennial data. Issue 34. Sakhalin region.] Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1990, 353 p. (In Russian).



Рисунок 1. Селевой бассейн на р. Рогатка. Сусунайский хребет. Фото Н.А. Казакова

Figure 1. Debris-flow basin on the Rogatka River. Susunayskiy Ridge. Photo by N.A. Kazakov



Рисунок 2. Селевые отложения р. Рогатки в г. Южно-Сахалинске. Фото А. Петрова

Figure 2. Debris-flow deposits of the Rogatka River in Yuzhno-Sakhalinsk. Photo by A. Petrov



Рисунок 3. Селевые глыбы на р. Рогатке. Фото Е.Н. Казаковой

Figure 3. Debris-flow boulders on the Rogatka River. Photo by E.N. Kazakova



Рисунок 4. Селевые бассейны на береговом уступе. Юго -восточное побережье о. Сахалина. 1 - интрузивный массив. Селевые очаги. Диориты, габбро-диориты, диоритовые порфириты. 2 - Береговой уступ. Зона транзита селей. Селевые очаги. Алевролиты, аргиллиты, песчаники. Фото Н.А. Казакова

Figure 4. Debris-flow basins on a cliff. South-Eastern coast of Sakhalin Island. 1-Intrusive array. Debris-flow sites. Diorites, gabbro-diorites, diorite porphyrites. 2 - Coastal ledge. Debris-flow transit zone. Siltstones, mudstones, sandstones. Photo by N.A. Kazakov



Рисунок 5. Селевой бассейн на береговом уступе. Юго -восточное побережье о. Сахалина. Отложения грязекаменного селя. Фото Н.А. Казакова

Figure 5. Debris-flow basin on a cliff. South-Eastern coast of Sakhalin Island. Debris-flow deposits. Photo by N.A. Kazakov

Селеобразующая сумма осадков превышает 50 мм при интенсивности осадков 30-50 мм/сутки. Однако, в случае предшествующего увлажнения пород потенциальных селевых массивов селевые процессы могут начинаться и при выпадении 10-20 мм осадков.

Вообще предварительное увлажнение грунтов потенциальных селевых массивов в результате снеготаяния или продолжительных дождей в период, предшествующий выходу циклонов, является одним из обязательных условий массового формирования селей.

Высокая интенсивность проявления селевых процессов на береговых уступах обусловлена большими уклонами селевых очагов и селевых русел (35°-50°) и составом горных пород в селевых очагах: слабосцементированные, легко размываемые и размокаемые алевролиты, аргиллиты, песчаники, слегающих днища и борта селевых очагов и селевых русел, за 1 – 3 года разлагаются до суглинков и в течение 2 – 3 лет формируют потенциальные селевые массивы толщиной 0,5 – 1,5 м.

Продукты разложения алевролитов и аргиллитов (средние и тяжёлые суглинки) насыщают селевой поток глинистыми фракциями и формируют коллоидную систему высокой плотности (1,5 – 1,9 кг/м^3).

Высокая плотность жидкой составляющей селя позволяет ему переносить валунно-глыбовый материал (песчаники, алевролиты, интрузивные, вулканогенные и метаморфические породы) на расстояние до 5 и более км.

Важно отметить, что жидкая составляющая, традиционно называемая «селевой суспензией», с точки зрения физики является не суспензией, а золем (коллоидом) и именно потому и достигает высокой плотности и вязкости.

Массовое формирование селей на о. Сахалине происходит в июле – октябре с периодичностью от 1 раза в 3-5 лет (в береговых геосистемах) до 1 раза в 10-12 лет (в горной части острова) и зависит как от повторяемости сильных осадков, так и от геологического и геоморфологического строения селевых бассейнов.

Во время прохождения тайфунов «Оджин» и «Филлис» 3–5.08.1981 г. на юго-западном побережье о. Сахалин (Невельский и Холмский районы) на участке побережья длиной 55 км было зарегистрировано 154 грязевых и грязекаменных селя объёмом селей до 12 тыс. м^3. В этот же период на юго-восточном побережье (Макаровский район) на участке длиной 30 км было зарегистрировано 55 селей объёмом до 50 тыс. м^3.

Всего же на Южном и Среднем Сахалине на побережьях и в горах (Сусунайский, Камышовый, Южно-Камышовых хребты) автором было зарегистрировано более 500 грязевых, грязекаменных и наносоводных селей максимальным объёмом объём более 300 тыс. м^3 (Сусунайских хребет; массив г. Макарова).

В результате массового селеобразования в августе 1981 г. в южных районах Сахалина селевыми потоками было разрушено в общей сложности несколько тысяч погонных метров автомобильных и железных дорог, разрушены линии связи и электропередач на протяжении нескольких тысяч метров, повреждено или разрушено несколько десятков жилых домов[3]; [Казаков, Жукова, 1988; Казаков, 2000; Полунин, 1983, 1989].

В сентябре 1992 г. массовое селеобразование на юго-восточном побережье (Макаровский район) вновь привело к многочисленным разрушениям полотна автомобильной и железной дорог, мостов, к повреждениям и разрушениям линий связи и электропередачи.

[3] Кадастр селей СССР. Том 18. Дальний Восток, Сахалин и Курильские острова. Выпуск 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
Kadastr selej SSSR tom 18 Dal'nij Vostok, Sahalin i Kuril'skie ostrova. Vypusk 4. L.: Gidrometeoizdat, 1986 (In Russian).

Автомобильное и железнодорожное сообщение между центральной и южной частью острова было прервано на две недели.

Массовый сход селей происходил на Южном Сахалине во время прохождения тайфунов «Чатаан» 11 - 15.07.2002 г., «Руса» 2.09.2002 г., при прохождении глубоких циклонов 26 – 30.07.2010 г., 11.08.2010 г., тайфуна «Джеби» 5-7.09.2018 г.

Последний период массового формирования селей отмечался на юго-восточном побережье о. Сахалина 5-6 сентября 2018 г. (рисунки 6-8).



Рисунок 6. Грязевой сель в г. Макарове 06.09.2018 г. Юго -восточное побережье о. Сахалина. Фото с сайта https://sakh.com/

Figure 6. Mudflow in the Makarov Town 06.09.2018. South-Eastern coast of Sakhalin Island. Photo from the site https://sakh.com/



Рисунок 7. Грязевой сель в г. Макарове 06.09.2018 г. Юго -восточное побережье о. Сахалина. Фото с сайта https://sakh.com/

Figure 7. Mudflow in the Makarov Town 06.09.2018. South-Eastern coast of Sakhalin Island. Photo from the site https://sakh.com/



Рисунок 8. Грязевой сель в г. Макарове 06.09.2018 г. Юго-восточное побережье о. Сахалина. Фото с сайта https://sakh.com/

Figure 8. Mudflow in the Makarov Town 06.09.2018. South-Eastern coast of Sakhalin Island. Photo from the site https://sakh.com/

После массового схода селей селевые очаги освобождаются от потенциальных селевых массивов накопления и в последующие 3-5 лет сильные дожди не приводят к образованию селей. Так, в августе 1981 г. на юго-восточном побережье о. Сахалина (Макаровский район) произошёл массовый сход селей. Летом 1982 г. в этот район вышел глубокий циклон, во время которого сумма выпавших осадков на гидрометеорологической станции «Макаров» превысила сумму осадков, выпавших во время тайфуна «Филлис» в 1981 г. Тем не менее, в районе не сошёл ни один сель – по той причине, что рыхлообломочные горные породы были вынесены из селевых очагов и селевых русел годом ранее, а новые потенциальные селевые массивы накопиться не успели.

Продолжительность периодов массового селеобразования составляет, как правило, от 1 до 3-5 суток.

Массовое формирование склоновых селей происходит также в береговых селевых геосистемах в середине мая – начале июня даже при выпадении менее 10 мм жидких осадков за сутки или во время продолжительных сильных туманов.

Малая величина селеобразующей суммы осадков в этот период обусловлена особенностями развития селевых процессов на береговых уступах и на морских террасах: активизация селевых процессов вызывается переувлажнением грунтов в потенциальных

селевых массивах вследствие весеннего снеготаяния: слабые осадки и продолжительные (более 7 суток) туманы приводят к переувлажнению грунтов до пределов текучести. Грунты переходят в текучее состояние и формируют грязевые и грязекаменные сели.

Грунты, переходя в текучее состояние, трансформируются в селевой поток. Как правило, в этот период формируются вязкие грязевые и грязекаменные потоки высокой плотности (до 1900-2100 кг/м^3) и малых объёмов (0,2 – 2,0 тыс. м^3). В связи с высокой плотностью селевой массы длина пути селей меньше, чем длина пути селей, сформировавшихся во время сильных дождей.

Порой массовый сход грязевых селей происходит на побережьях острова в мае – июне по окончании периода весеннего снеготаяния: при последующем увлажнении грунтов потенциальных селевых массивов за счет слабых дождей и густых туманов формируются жидкие грязевые потоки объемом до 0,5 тыс. м^3.

Периоды массового селеобразования отмечались на Южном и Среднем Сахалине в 1872, 1875, 1928, 1931, 1935, 1936,1932, 1942, 1944,1947, 1954, 1964, 1970, 1976, 1978, 1981, 1992, 1993, 1998, 2002, 2003, 2009, 2010, 2011, 2013, 2018 г.г. (Таблица 1).

Таблица 1. Некоторые случаи массового формирования селей на о. Сахалине в 1872–2018
Table 1. The mass of debris-flows formation on the Sakhalin Island in 1872 – 2018.

№№п/п	Дата Date	Количество селей Number of debris-flows	Типы селей Debris-flows types	Объём селей, тыс. м^3 Debris-flows volume, thousand m^3		Сумма осадков, мм Amount of precipitation, mm	Дата выпадения осадков Date of precipitation
				Средн. Average	Макс Max.		
1.	Июль – август 1872		ГК		Более 300,0		Июль – август 1872
2.	07-19.09.1875		ГК		Более 300,0		07 - 19.09.1875
3.	1944						
4.	1947		ГК		Более 100,0		
5.	1954						
6.	11-13.09.1956					126,9	11-13.09.1956
7.	3-5.06.1964					42,2	06.06.1964
8.	17.07.1967					163,1	17.07.1967
9.	18-19.09.1970					167,2	18-19.09.1970

№№п/п	Дата Date	Количество селей Number of debris-flows	Типы селей Debris-flows types	Объём селей, тыс. м^3 Debris-flows volume, thousand m^3		Сумма осадков, мм Amount of precipitation, mm	Дата выпадения осадков Date of precipitation
				Средн. Average	Макс Max.		
10.	18-19.09.1970					335,5	18.09.1970
11.	20-21.07.1978		Г, ГК, НВ			163,4	13-17.07.1978
12.	3-4.08.1978		Г, ГК, НВ			147,2	3-4.08.1978
13.	5-6.08.1981	более 500	Г, ГК, НВ	5,0	Более 300,0	1277,0	3-6.08.1981
14.	6-7.04.1982	3	ВСП			32,1	6 - 7.04.1982
15.	2-5.09.1992		Г, ГК, НВ			142,3	2-3.09.1992
16.	1993		Г, ГК, НВ			329	
17.	25-26.09.1996	23	Г, ГК, НВ		2,0		
18.	21 - 22.07.2000	48	Г, ГК, НВ	0,3	18,0		
19.	22-24.06.2009	50	Г, ГК, НВ		3,0		22-24.06.2009
20.	28-30.07.2010	67	Г, ГК, НВ	0,5	4,0	157,0	26-30.07.2010
21.	10-11.08.2010	22	Г, ГК, НВ	0,1		145,3	9-12.08.2010
22.	2011		Г, ГК, НВ				
23.	2013		Г, ГК, НВ				
24.	4-9.09.2016		Г, ГК, НВ				
25.	21-22.07.2017		Г, ГК, НВ				
26.	04 –05.09.2018		Г, ГК, НВ		10,0	125,0	4 -5.09.2018

Примечание. Тип селя: Г – грязевой, ГК – грязекаменный,

НВ – наносоводный, ВСП – водоснежный.

Note. Debris flows type: Г – mudflow, ГК – debris flows, НВ - suspended stream, ВСП – slushflow.

Выводы

1. Доминирующими факторами селевых процессов на о. Сахалине при массовом селеобразовании являются геологические факторы: состав горных пород потенциальных селевых массивов накопления, степень их увлажнения и критический объём.

2. Сильные атмосферные осадки приводят к массовому селеобразованию только при соответствующем состоянии потенциальных селевых массивов.

3. Одним из обязательных условий массового формирования селей является предварительное увлажнение грунтов потенциальных селевых массивов в результате снеготаяния или продолжительных дождей в период, предшествующий выходу циклонов.

4. После массового схода селей селевые очаги освобождаются от потенциальных селевых массивов накопления и в последующие 3-5 лет сильные дожди не приводят к образованию селей.

5. В связи с предыдущим выводом, рассчитывать значения селевых расходов 1% и 5% обеспеченностей на основе расчёта расходов и уровней водных паводков в селеносных водотоках 1% и 5% обеспеченности и на основе расчётов 1% и 5% обеспеченности осадков, выпадающих в селевом бассейне недопустимо.

6. Периоды массового селеобразования отмечались на Южном и Среднем Сахалине в 1872, 1875, 1928, 1931, 1935, 1936,1932, 1942, 1944, 1947, 1954, 1964, 1970, 1976, 1978, 1981, 1992, 1993, 1998, 2002, 2003, 2009, 2010, 2011, 2013, 2018 г.г.

7. В среднем, периоды массового формирования селей повторяются на Среднем и Южном Сахалине каждые 5 – 6 лет.

Литература

Казаков Н.А. Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин): Автореф. дисс. … канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск, 2000. 36 с.

References

Kazakov N.A. *Geologicheskie i landshaftnye kriterii ocenki lavinnoj i selevoj opasnosti pri stroitel'stve linejnyh sooruzhenij (na primere o. Sahalin). Avtoref. diss. kand. geol-min. najuk. [Geological and landscape criteria for assessing avalanche and debris flow hazard during the construction of linear structures (on the example of Sakhalin Island). Ph. D. (geological and mineralogical) Thesis]*. Yuzhno-Sahalinsk, 2000. 36 p. (In Russian).

Казаков Н.А., Жируев С.П. Методика построения среднемасштабных карт природных селевых комплексов // Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации и земельный кадастр / Под ред. Г.Л. Кофф Вып. 5. М.: Полтекс, 2002. С. 113-114.

Kazakov N.A, Zhiruev S.P. Metodika postroeniya srednemasshtabnyh kart prirodnyh selevyh kompleksov [Methodology for constructing medium-sized maps of natural mudflow complexes]. In G.L. Koff (ed.), *Prikladnaya geoekologiya, chrezvychajnye situacii i zemel'nyj kadastr [Applied geoecology, emergency situations and land cadastre]*. Vol. 5. Moscow, Publ. Polteks, 2002, pp. 113-114. (In Russian).

Казаков Н.А, Жируев С.П. Таксономические категории природных селевых комплексов (на примере о. Сахалин) // Материалы Шестой всероссийской конференции «Оценка и управление природными рисками (Риск – 2006)» (г. Москва, 20 апреля 2006 г.). М.: РУДН, 2006. С. 48-50

Kazakov N.A, Zhiruev S.P. Taksonomicheskie kategorii prirodnykh selevykh kompleksov (na primere o. Sakhalin) [Taxonomic categories of natural mudflow complexes (on the example of Sakhalin Island)]. *Materialy Shestoi vserossiiskoi konferentsii «Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami (Risk – 2006)» (g. Moskva, 20 aprelya 2006 g.) [Materials of the Sixth All-Russian Conference "Assessment and Management of Natural Risks (Risk – 2006)" (Moscow, April 20, 2006)]*. Moscow, Publ. RUDN, 2006, pp. 48-50 (In Russian).

Казаков Н.А., Жукова З.И. Районирование о. Сахалин по степени проявления селевой деятельности // Труды гидрометцентра Сахалинского УГМС. Региональные исследования. Южно-Сахалинск: СУГМС, 1988. С. 131-137.

Kazakov N.A., Zhukova Z.I. Raionirovanie o. Sakhalin po stepeni proyavleniya selevoi deyatel'nosti [Zoning of Sakhalin Island by the degree of manifestation of mudflow activity]. *Trudy gidromettsentra Sakhalinskogo UGMS. Regional'nye issledovaniya [Proceedings of the hydrometeorological center of the Sakhalin Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring (SDHEM). Regional studies]*. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. of SDHEM, 1988, pp. 131-137. (In Russian).

Казакова Е.Н. Ущербы от селевых потоков на о. Сахалин // Сборник трудов III Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, про-

Kazakova E.N. Ushcherby ot selevykh potokov na o. Sakhalin [Damage from mudflows on Sakhalin Island]. In Kazakov N.A. (ed.) *Sbornik trudov tret'ei Mezhdunarodnoi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zash-*

гноз, защита» (Южно-Сахалинск, 22-26 сентября 2014 г.). Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 2014. С. 75-77.

Полунин Г.В., Бузлаев В.А. Карта литологических комплексов и проявлений экзогенных процессов Сахалина: масштаб 1:500 000. М.: ГУГК, 1984.

Полунин Г.В. Динамика и прогноз экзогенных процессов: физические аспекты экзогенных процессов. М.: Наука, 1989. 231 с.

Полунин Г.В. Экзогенные геодинамические процессы гумидной зоны умеренного климата (физические аспекты экзогенных процессов). М.: Наука, 1983. 249 с.

Рыбальченко С.В. Активизация селевых процессов на юго-западном побережье Южного Сахалина в июле-августе 2010 года // Материалы 4-й Всероссийской конференции молодых ученых «Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России» (г. Владивосток, 27 августа-5

chita» (Yuzhno-Sakhalinsk, 22-26 sentyabrya 2014 g.) [Proceedings of the third International Conference "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Yuzhno-Sakhalinsk, September 22-26, 2014)]. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. of Sakhalin Department of Far East Geological Institute FEB RAS, 2014, pp. 75-77. (In Russian; abstract in English).

Polunin G.V., Buzlaev V.A. *Karta litologicheskikh kompleksov i proyavlenii ekzogennykh protsessov Sakhalina: masshtab 1:500 000 [Map of lithological complexes and manifestations of exogenous processes of Sakhalin: scale 1:500 000].* Moscow, Publ. of Main Office of Geodesy and Cartography USSR, 1984. (In Russian).

Polunin G.V. *Dinamika i prognoz ekzogennykh protsessov: fizicheskie aspekty ekzogennykh protsessov [Dynamics and prognosis of exogenous processes: physical aspects of exogenous processes]*. Moscow, Publ. Nauka, 1989. 231 p. (In Russian).

Polunin G.V. *Ekzogennye geodinamicheskie protsessy gumidnoi zony umerennogo klimata (fizicheskie aspekty ekzogennykh protsessov) [Exogenous geodynamic processes of the humid zone of a temperate climate (physical aspects of exogenous processes)]*. Moscow, Publ. Nauka, 1983. 249 p. (In Russian).

Rybal'chenko S.V. Aktivizatsiya selevykh protsessov na yugo-zapadnom poberezh'e Yuzhnogo Sakhalina v iyule-avguste 2010 goda [Intensification of mudflow processes on the southwestern coast of South Sakhalin in July-August 2010]. *Materialy chetvertoi Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh «Sovremennye problemy geologii, geokhimii i geoekologii Dal'nego Vostoka Rossii» (g. Vladivostok, 27 avgusta-5 sentyabrya 2012 goda) [Materials of*

сентября 2012 года). Владивосток: Дальнаука, 2012a. С. 42-44.

Рыбальченко С.В. Опасность склоновых селевых потоков на юго-западном побережье Сахалина и западном побережье залива Терпения // Труды Второй конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», посвященной 100-летию С.М. Флейшмана (г.Москва, 17-19 октября 2012 года) / Отв. ред. С.С. Черноморец. М.: Географический факультет МГУ, 2012b. С. 82-83.

Рыбальченко С.В. Селевые процессы на склонах морских террасах Южного Сахалина. // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2013. № 3 (169). С.52-59.

Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Склоновые селевые бассейны и их морфодинамические особенности. // Геориск. 2017. № 4. С. 58-63.

the fourth All-Russian conference of young scientists "Modern problems of geology, geochemistry and geoecology of the Far East of Russia" (Vladivostok, August 27-September 5, 2012)]. Vladivostok: Publ. Dal'nauka, 2012a, pp. 42-44. (In Russian).

Rybal'chenko S.V. Opasnost' sklonovykh selevykh potokov na yugo-zapadnom poberezh'e Sakhalina i zapadnom poberezh'e zaliva Terpeniya [Debris flow hazard on south-western shore of Sakhalin Island and western shore of the Terpeniya Bay]. In Chernomorets S.S. (ed.) *Trudy Vtoroi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita», posvyashchennoi 100-letiyu S.M. Fleishmana (g.Moskva, 17-19 oktyabrya 2012 goda) [Proceedings of the Second Conference «Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection» dedicated to 100th anniversary of S.M. Fleishman (Moscow, October 17-19, 2012)]*. Moscow, Publ. Geograficheskii fakul'tet MSU, 2012b, pp. 82-83. (In Russian).

Rybal'chenko S.V. Selevye protsessy na sklonakh morskikh terrasakh Yuzhnogo Sakhalina [Mudflows on the slopes of the marine terraces of South Sakhalin]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences],* 2013, No 3 (169), pp.52-59. (In Russian).

Rybal'chenko S.V., Verkhovov K.V. Sklonovye selevye basseiny i ikh morfodinamicheskie osobennosti [Slope debris flow basins and their morphodynamic features]. *Georisk [Georisk]*. 2017, No 4, pp. 58-63, 78. (In Russian, abstract in English).

УДК 551.4.042

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕВОГО ПОТОКА ПО ВИДЕОМАТЕРИАЛАМ

Д.П. Соколова[1], В.А. Куровская[2], А.А. Осташов[1], Н.А. Казаков[3,4]

[1]ООО «Джи Динамика», г. Санкт-Петербург, Россия, [2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [3]Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; [4]Научно-исследовательский центр "Геодинамика", г. Южно-Сахалинск, Россия

dariia.sokolova@yandex.ru

Аннотация. Для проектирования сооружений противоселевой защиты необходимо знать значения таких характеристик селя, как скорость потока и давление селевой массы на преграду. Определение этих характеристик часто вызывает трудности из-за того, что сель – достаточно редкое событие и постоянные наблюдения за ними ведутся на селестоковых станциях, которых во всем мире немного. В настоящее время в интернете появилось большое количество видеосъемок, на которых запечатлен сход селевого потока. Такой материал можно использовать для получения не только качественных, но и количественных характеристик селевого потока. В тех случаях, когда имеется возможность определить на видео

EVALUATION OF DEBRIS FLOW DYNAMIC CHARACTERISTICS BY VIDEO MATERIALS

Dariia P. Sokolova[1], Viktoriia A. Kurovskaia[2], Andrey A. Ostashov[1], Nikolay A. Kazakov[3,4]

[1]G-Dynamic Ltd, Saint-Petersburg, Russia, [2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, [3]Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [4]Research Center for the Study of Geodynamic Processes "Geodynamics", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

dariia.sokolova@yandex.ru

Abstract. For mud dams construction it is necessary to clarify characteristics of debris flow such as flow velocity and pressure on the barrier. Determining these characteristics often causes difficulties due to the fact that debris flow is rather rare event and constant monitoring of them is carried out at mud flow observation station stations, which are few worldwide. Currently large number of videos have appeared on the Internet that captures debris

Соколова Д.П., Куровская В.А., Осташов А.А., Казаков Н.А. Оценка динамических характеристик селевого потока по видеоматериалам // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 31-51, DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.003

масштаб и конкретное место схода селя, определение его скорости и других характеристик составляет выполнимую задачу. В статье представлена попытка количественной оценки скорости селевого потока по материалам видеосъемки с последующим сравнением полученных результатов со значениями, рассчитанными по различным методикам. В качестве объекта нашего исследования был выбран селевой поток, сошедший в Австрии, г. Фирген 4 августа 2012 года. Съемка производилась с нескольких ракурсов, что позволило выбрать участок канала, на котором оказалось возможным произвести измерение скорости движения серии селевых волн. Расчет скорости селевого потока и давления на препятствие производился по методикам разных исследователей. Измеренные на видеоролике скорости селевых волн на разных участках составили: минимальная – 7,4 м/с, максимальная – 10 м/с. Различия между рассчитанными по разным методикам и измеренными по видео значениями составляют от 0,1 м/с до 4,8 м/с. Кроме этого, были проведены расчеты расхода селевого потока и плотности селевой массы. Нами использовалась модель транспортно-сдвигового селевого процесса, разработанная Ю.Б. Виноградовым. При сравнении полученных значений с результатами австрийских коллег было выявлено, что значения характеристик похожи, но разброс значений по данной модели меньше.

Ключевые слова: селевой поток; скорость селевого потока; видеосъемка селевого потока; давление селя; селевая волна; селевой расход.

flow descent. This material can be used to obtain not only qualitative, but also quantitative characteristics of the debris flow. In cases, when it is possible to determine the scale and specific location of debris flow on a video, measuring its velocity and other characteristics is a workable task. This research present an attempt to quantify the debris flow velocity based on the video materials with the subsequent comparison of the results obtained using various methods. The object of our study was the debris flow that came down in Austria, in Firgen on August 4, 2012. The survey was carried out from several angles, which made it possible to select a section of the channel to measure the velocity of debris flow wave train. Calculation of flow velocity and pressure on the barrier was conducted by several methods developed by various researchers. Debris flow velocities measured on the video are minimum – 7,4 m/s, maximum - 10 m/s. Differences between calculated by various methods and measured on the video values range from 0,1 m/s to 4,8 m/s.

Keywords: debris-flow; velocity of debris-flow; video material of debris-flow; pressure of debris-flow; debris-flow wave; debris-flow discharge.

Sokolova D.P., Kurovskaia V.A., Ostashov A.A., Kazakov N.A. Evaluation of debris flow dynamic characteristics by video materials. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 31-51 (in Russian; abstract in English) DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.003

Введение

Один из важнейших вопросов, возникающих при изучении и моделировании селевых процессов (как при научных исследованиях, так и при проектно-изыскательских работах) – это вопрос о скорости движения селевого потока.

Данных прямых измерений скоростей селевого потока, полученных непосредственно во время его движения [Vinogradova, Vinogradov, 2017], недостаточно. Прямое измерение характеристик потока связано со многими трудностями, главная из которых заключается в том, что специалисты-селевики не часто могут вживую наблюдать данное явление.

Значения скорости селевого потока, рассчитанные по результатам полевых исследований, проведённых сразу же после схода, не позволяют получить достоверные результаты, поскольку расчётные методики базируются в большинстве своем на математических моделях, изобилующих эмпирическими коэффициентами.

Решение этой проблемы возможно лишь при использовании большого объёма натурных наблюдений за селевыми потоками, и измерении их скорости во время движения.

Постановка проблемы

Получение натурных количественных данных о каждом селевом событии является важной и сложной задачей селеведения. Сель – достаточно редкое событие, и определить его динамические характеристики зачастую удается только по косвенным признакам.

Однако в последнее время в интернете появилось большое количество видеосъемок, на которых запечатлен сход селевых потоков. Такой материал можно использовать для получения качественных и количественных характеристик селевого потока: таких, как структурно-реологический тип, характер движения селевого потока, форма селевых волн и скорость селя на разных участках селевого русла.

Если в кадре есть объекты, которые можно использовать в качестве привязки масштаба снимка, мы можем оценивать некоторые количественные характеристики селя, а именно скорость потока, а при возможности определения площади поперечного сечения русла – расход селя.

Целью нашего исследования является попытка измерения скорости селевого потока по материалам видеосъемки и сопоставление полученных результатов с расчетными значениями по различным методикам.

Объект исследования

Географические, геологические и гидрологические условия Восточных Альп определяют возможность образования и высокую повторямость селевых потоков больших объёмов.

Суточные максимумы осадков могут достигать 200-250 мм [Aulitzky H., 1989].

Количество рыхлообломочного материала в конусе выноса в результате схода катастрофических селей достигает от сотен тысяч до миллиона м^3 [Aulitzky, 1989]. Следует упомянуть, что поскольку заселённость Альп человеком очень велика, катастрофические сели сразу попадают в разряд национальных бедствий [Виноградов,1980]. Первое упоминание о селевом потоке в Австрии относится к 600 году, когда сель сошел из ущелья Ланбах в долину Инна у селения Швац [Виноградов,1980].

4 августа 2012 г. по ручью Фиршницбах сошел грязекаменный сель. В результате пострадал населенный пункт Фирген, были повреждены объекты инфраструктуры и жилые постройки. Сель был заснят на видеокамеры с нескольких ракурсов местными жителями, что позволило нам определить некоторые качественные и количественные характеристики селя.

Ручей Фиршницбах (рисунок 1) является левобережным притоком реки Изель в муниципалитете Фирген. Площадь водосбора составляет 4,1 км², длина ручья Фиршницбах равняется 5,5 км, перепад высот от истока до устья 1955 м. Самая высокая точка водосбора – г. Миттерегшпитце с 3044 м над уровнем моря, устье р. Изель расположено на высоте 1089 м над уровнем моря [Hübl, 2012].

Водосбор бассейна располагается на территории Пеннинских Альп. Особое внимание следует уделить наличию филлитовых сланцев, которые обладают высоким содержанием глинистых частиц, способных связывать воду в грунтах (по нашему мнению, обязательное условие, необходимое для формирования связных селей), а также наличием рыхлообломочного моренного и осыпного материала в верхней части водосбора, который образует потенциальный селевой массив. Коренные породы представлены известково-слюдяными сланцами, метабазитами и ультраосновными породами [Vinogradova, Vinogradov, 2017], которые насыщают сель крупнообломочным материалом.

Около четверти водосборной площади занято хвойным лесом, 27% площади – луговые пастбищные угодья и альпийские луга, 38% – незадернованные рыхлообломочные отложения. Остальные 10% подвержены застройке [Hübl, 2012].

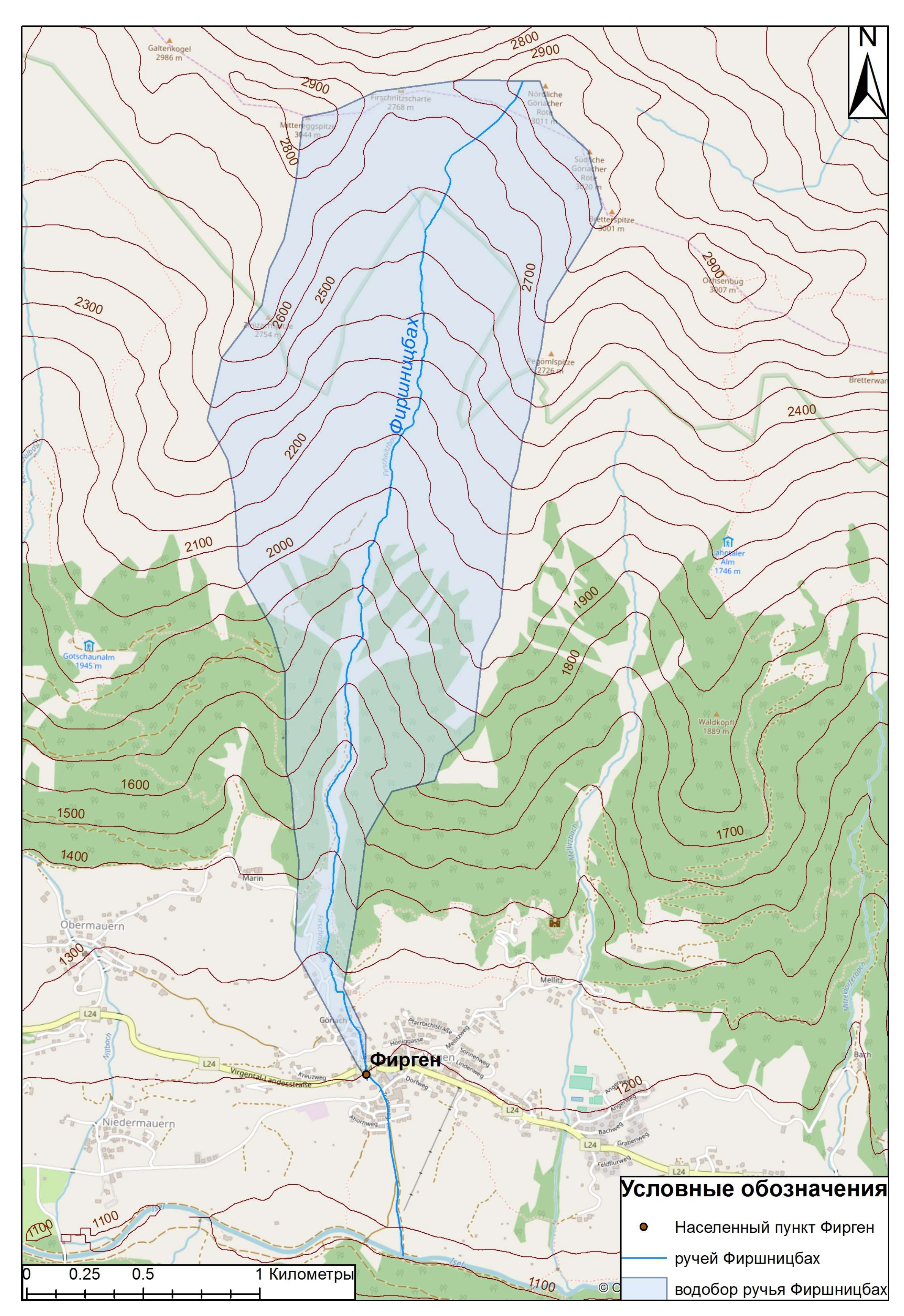


Рисунок 1. Схема бассейна ручья Фиршницбах

Figure 1. The scheme of basin Firschnitzbach river

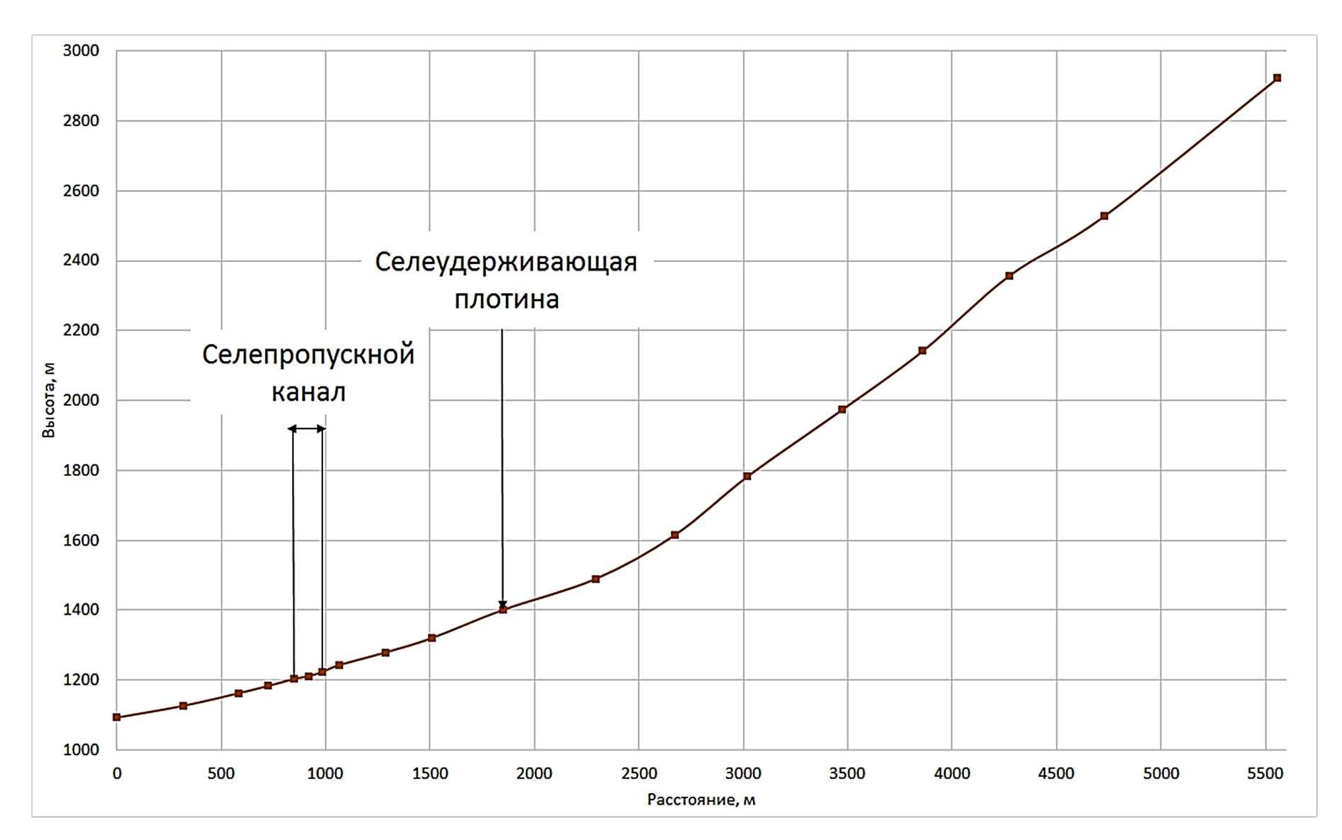


Рисунок 2. Продольный профиль ручья Фиршницбах

Figure 2. The longitudinal profile of the Firschnitzbach stream

В водосборе ручья Фиршницбах имеется ряд противоселевых сооружений (рисунок 2). Селеудерживающая дамба располагается в 1830 м от устья и запроектирована под задержание 25000 м^3 селевого материала. Ниже плотины расположен селепропускной канал, рассчитанный на пропуск селевого потока расходом 60 м^3/с [Hübl, 2012].

Грязекаменный сель, сошедший 04.08.2012 г.

Прохождению селевого потока предшествовал сильный ливень интенсивностью 2 мм/мин. Продолжительность первого ливня – 30 минут. 4 августа 2012 г. через 15 минут после начала дождя, в 15:25 по местному времени, жители Фиргена наблюдали первую волну селевого потока. Всего за 40 минут было зарегистрировано 12 селевых волн. На момент образования первой селевой волны выпало около 30 мм осадков.

На втором этапе прохождения селевого потока в течение 50 минут возникло 27 селевых волн. На этом этапе сель также стал следствием выпадения ливня такой же интенсивности длительностью 45 минут. К моменту начала второго этапа прохождения селя, ёмкость перед селезадерживающей дамбой была переполнена, и поток шел через гребень

плотины. В общей сложности за период прохождения двух серий волн и др. было вынесено 70000 $м^3$ материала [Hübl, 2012].

Динамические характеристики данного селевого потока оказались выше проектных значений селезащитных сооружений Фиргена. Ёмкость перед селезадерживающей плотиной уже после первой серии волн заполнилась селевыми отложениями. Селепропускной канал оказался не способен пропустить максимальные расходы селевого потока, поэтому селевая масса выходила из берегов канала и разливалась по тротуарам.

Материалы и методы

Видеоматериал о прохождении данного селевого потока был предоставлен Йозефом Фибигером (консультант по вопросам борьбы с эрозией, селевыми потоками, лавинами и лесного хозяйства; исследовательская группа МСНИЛО 8.03 стихийные бедствия, Зальцбург, Австрия) на 4-ой международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Иркутск – Аршан, 6-10 сентября 2016 г).

Съемка проводилась с разных точек города, где селевой поток двигался по бетонированному ступенчатому селепропускному каналу (рисунок 2).

Нами были выбраны кадры из видео, на которых представлялось возможным определить место на спутниковом снимке, где прошел селевой поток.

При определении скорости селевого потока с помощью материалов видеосъемки необходимо знать расстояние, которое он пройдет, и продолжительность его движения.

Сначала производилась привязка селепропускного канала города Фирген в программном пакете ArcGIS. Привязка осуществлялась по контрольным точкам канала на спутниковом снимке (мост, парковка, ступень на повороте) (рисунок 3).

Нами были выбраны три участка, на которых на видео отчетливо видно движение фронта селевой волны.

Первый участок, на котором было зафиксировано максимальное число волн: от парковки (2) до моста (3). Второй участок начинается от ступени на повороте канала (1) до моста (3). Третий участок: от поворота (1) до парковки (2) (рисунок 3).

Глубина потока определялась с помощью привязки масштаба снимка по объектам с известными параметрами. Например, использовались такие объекты как человек, машина и другие. В программе ArcGIS были выполнены необходимые измерения длины и ширины канала для дальнейших расчетов (таблица 1).



Рисунок 3. Схема участков прохождения селевого потока: 1 – ступень на повороте, 2 – ступень напротив парковки, 3 – мост.

Figure 3. The scheme of sections of the passage of the debrisflow: 1 – step on the turn, 2 – step in front of the parking, 3 – bridge.

Таблица 1. Основные параметры канала

Table 1. The main parameters of the channel

Участок		Ширина канала, м	Глубина канала, м	Длина ступени, м	Уклон, град.	Количество волн
N п/п	Адрес, м от устья р. Фиршницбах					
1	920-850	5,8	3,0	14,3	10,6	10
2	985-850	5,8	3,0	14,3	10,2	3
3	985-920	5,8	3,0	14,3	9,8	3

Определение скорости осуществлялось следующим способом.

В программном пакете Shortcut фиксировалось время прохождения фронта селевой волны на контрольных точках, которым соответствовали ступени в канале. Скорость рассчитывалась как расстояние, деленное на время.

Скорость селевого потока, прошедшего через г. Фирген, была рассчитана нами по различным методикам.

Для расчета использовались формулы И.И. Херхеулидзе, В.В. Голубцова, М.Ф. Срибного, Кханна, Академии ГПС МЧС России.

«Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям»[1] рекомендует использовать для расчета скоростей селевого потока следующие формулы:

$$v_c = 4{,}83h^{0,5}(sin\alpha)^{0,25}, \quad (1)$$

где h – средняя глубина потока, м;

α – средний угол наклона селевого русла на участке.

Формула (1) предложена И.И. Херхеулидзе.

Для расчетов скорости селя, также используется формула М.Ф. Срибного [Срибный, 1960]:

$$v_c = \frac{6{,}5R^{2/3}I^{1/4}}{\sqrt{\frac{\gamma_c\gamma_т - \gamma_т}{\gamma_т - \gamma_c} + 1}}, \quad (2)$$

где R – гидравлический радиус потока в метрах,

I – уклон русла,

$\gamma_т$ – плотность наносов, т/м^3

γ_c – средняя плотность селевой массы, т/м^3.

Так же для определения скорости селевого потока используют формулу Кханна [Голубцов, 1969]:

$$v_с = 8{,}05h_{ср}^{0,58}i^{0,30}, \quad (3)$$

где h_{cp} – средняя глубина потока, м;

i – продольный уклон русла на участке.

По «Учебно-методическому пособию», выпущенному Академией ГПС МЧС России[2], скорость селевого потока можно определить по формуле:

$$v_с = 11{,}4h_{ср}^{0,5}\left(Usin\alpha^{\frac{1}{3}}\right), \quad (4)$$

[1] РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям, 1990. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. Гидрометеоиздат, Москва.

[2] Крюков Е. В., Бутенко В. М. 2013. Опасные природные процессы: учеб.-метод. Пособие. М.: Академия ГПС МЧС России

где U – относительная гидравлическая крупность вовлекаемых в поток каменных материалов (для оперативных расчетов принимается равным 0,7…1,0 м/с); в наших расчётах принято значение 1,0 м/с.

Так же, Голубцов В.В. [Голубцов, 1969] предложил формулы для расчета скорости грязевых и грязекаменных потоков:

$$v_{с} = 3{,}75 h_{ср}^{0{,}5} i^{0{,}17}, \tag{5}$$

Кроме определения скорости движения селевого потока нами был произведен расчет давления селя на препятствие по известным формулам, в которые в основном входит скорость селя и плотность селевой массы. Для расчета селевого давления были взяты следующие формулы:

Формула для расчета давления селевого потока, предложенная ГрузНИИГиМ:

$$P = \frac{K(\gamma_c {v_{с}}^2)}{g}, \tag{6}$$

где $K = 4{,}5$,

g – ускорение свободного падения, м/с^2,

γ_c – плотность селевой массы, кг/м^3 [Молжигитов, 2016].

Формула, предложенная Б.Н. Ржевским и Н.Ф. Нечаевым [Молжигитов, 2016]:

$$P = 2{,}15(\gamma_c v_{с})^{1{,}33}, \tag{7}$$

Й. Холцинерем и Г. Хиублем предложены формулы расчета на основе комбинированной модели гидростатического и гидродинамического воздействия [Молжигитов, 2016]:

$$P = 5\gamma_c (v_{с})^{0{,}8} (gh)^{0{,}6}, \tag{8}$$

где h – глубина потока, м.

По волновой модели гидравлического удара была предложена А.Л. Гонором и Е.Г. Пик-Пичаком следующая формула расчета:

$$P = a\gamma_c v_{с} c, \tag{9}$$

где c – скорость звука в среде, м/с,

a – процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте, меняется в пределах 0-0,04 [Гонор, Пик-Пичак, 1983].

Формула, предложенная И.И. Херхеулидзе [Молжигитов, 2016]:

$$P = 3{,}5(1{,}35(\frac{{v_c}^2}{g})({\gamma_c}^{1,5})^{0,45} \quad (10)$$

Результаты и обсуждение

Кроме высокой насыщенности рыхлообломочным материалом, селевой поток характеризуется волновым движением [Казаков, 2001].

Механизм образования волн еще полностью не изучен, но в качестве одной из причин некоторые авторы выделяют различие в скоростях перемещения обломков разной крупности. Однако на имеющихся кадрах селевого потока наблюдаются волны, насыщенные, как глыбово-валунным материалом, так и глинистыми частицами. Также в качестве источника образования селевых волн представлялось обрушение порций грунта в селевой поток.

Однако волны образуются в течение всего времени прохождения потока, как это можно наблюдать на видео, а их динамические характеристики и частота не соответствуют волнам, образующимся при обрушении грунта. Селевая волна отличается асимметрией, крутой передний фронт создает «голову селя»[3]. По имеющимся видеоматериалам определить высоту «головы селя» не представлялось возможным.

Согласно В.Ф. Перову3 интервал между волнами может составлять от нескольких минут до десятков секунд, увеличиваясь в конечной стадии, что и было зарегистрировано на видео. Несмотря на то, что видеоматериалы являются скомпонованными из частичных наблюдений, по нескольким волнам с непрерывной съемкой минимальный временной интервал составлял 13 секунд в начале прохождения селевого потока, ближе к концу он увеличился до 22 секунд.

В данном исследовании были получены значения скоростей движения фронта селевого потока по видеосъемке, анализировалась форма волны, а также характер движения (таблица 2).

[3] Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. М.: изд. МГУ. 1996. С. 45

Таблица 2. Результаты

Table 2. Results

Участок		№ селевой волны	Глубина потока, м	Время прохождения, с	Скорость, м/с	Расход, м^3/с	Примечание
N п/п	Адрес, м от устья р. Фиршницбах						
1	920-850 м	1	2,7	8,4	8,1	125	наблюдается перелив через борта канала
		2	2,7	9,5	7,2	111	в начале – квазиустановившееся течение, далее появляется ступенчатый характер
		3	3,4	6,8	10,0	196	скорость фронта волны выше основного тела; перелив через борта канала
		4	2,5	8,4	8,1	116	скорость фронта волны выше основного тела; проявляется ступенчатый характер
		5	2,9	7,7	8,8	147	скорость фронта волны выше основного тела, наблюдается растекание материала вдоль русла
		6	3,0	7,3	9,3	160	скорость фронта волны выше основного тела, возможно появление пылевого облака, происходит выход селевого потока за пределы канала
		7	3,2	7,0	9,8	180	скорость фронта волны выше основного тела, растекание материала через борта, наблюдается захлестывание волны на мост
		8	3,4	7,1	9,6	188	на начальный стадии наблюдается как единое тело, отмечается ступенчатый характер, часть

Участок		№ селевой волны	Глубина потока, м	Время прохождения, с	Скорость, м/с	Расход, $м^3/с$	Примечание
N п/п	Адрес, м от устья р. Фиршницбах						
							материала откладывается на мосту
		9	2,5	8,0	8,5	122	квазиустановившееся течение, канал занесен селевыми отложениями, наблюдается растекание материала за бортами канала
		10	2,0	9,2	7,4	85	форма волы - кинк, канал занесен селевыми отложениями
2	985-850 м	4	2,5	16,5	7,9	114	скорость фронта волны выше основного тела, проявляется ступенчатый профиль
		5	2,9	15,5	8,4	141	скорость фронта волны выше основного тела, наблюдается растекание материала вдоль русла
		7	3,2	12,2	9,5	174	скорость фронта волны выше основного тела, растекание материала через борта канала, наблюдается захлестывание волны на мост
3	985-920 м	4	2,5	8,1	7,7	111	скорость фронта волны выше основного тела, проявляется ступенчатый профиль
		5	2,9	7,8	8,0	134	скорость фронта волны выше основного тела, наблюдается растекание материала вдоль русла
		7	3,2	6,8	9,2	169	скорость фронта волны выше основного тела, растекание материала через борта канала, наблюдается захлестывание волны на мост

Как известно, скорость максимума волны намного превышает значения для подошвы, где наблюдается стационарный расход, что и было зафиксировано на данном видеоматериале. Также зачастую во время прохождения селевого потока по бетонированным ступеням происходило разрушение фронта волны с последующем растеканием материала за борта канала. Кроме того, несколько раз наблюдалось захлестывание гребня волны на мост и соответственно отложение материала.

В связи с тем, что у нас отсутствуют видеоматериалы или же наблюдения за движением селевого потока на пологом бетонированном канале, однозначно утверждать о наборе энергии на ступенях, а также расплескивании материала вследствие конструкции канала не представляется возможным. Однако можно предположить, что бетонированный канал был изначально сконструирован для небольших селевых потоков, тогда данная форма сооружения увеличивала бы коэффициент шероховатости, что в свою очередь уменьшало скорость волны. Но характеристики исследуемого потока оказались выше ожидаемых, что привело к наложению волн и росту скорости 6 из 10 селевых волн. Таким образом, при определенных условиях ступени способны оказывать противоположный от задуманного эффект. Также стоит отметить, что высота заплесков на домах, непосредственно прилегающих к выбранному участку в канале, доходила до 7 метров.

Скорости движения фронта селевых волн менялись от 7,4 м/с до 10 м/с на протяжении видеосъемки. Исходя из полученных результатов, видно, что чем больше глубина потока, тем выше скорость движения. Например, волна №3, глубиной 3,4 метра, двигалась со скоростью 10 м/с, а волна №10, глубиной 2 метра – со скоростью 7,4 м/с. Три волны (№ 4,5,7) удалось обнаружить на трёх участках. Скорости движения этих селевых волн различаются от 0,3 м/с до 0,8 м/с, что говорит о непостоянстве скорости селевого потока.

Сотрудниками Австрийского Института Горных Опасностей была определена скорость потока по видеоматериалам в створе канала (530 м от устья ручья Фиршницбах), разброс значений составил от 4 до 10 м/с [Hübl, 2012].

В таблице 3 и на рисунке 4 приведены результаты расчетов скоростей движения селевого потока по различным методикам, описанным в главе «материалы и методы».

Таблица 3. Скорости селевого потока, рассчитанные по различным методикам

Table 3. Velocity of debris flow, calculated according to different methods

Данные			Скорость селя, м/с					
№ селевой волны	Глубина, м	Уклон, град.	по И.И. Херхеулидзе	Академия ГПС МЧС России	по В.В. Голубцову	по М. Ф. Срибному	по Кханну	Скорость фронта (по видео)
1	2,7	10,6	5,2	10,2	4,6	5,4	8,7	8,1
2	2,7	10,6	5,2	10,2	4,6	5,4	8,7	7,2
3	3,4	10,6	5,9	11,4	5,2	6,3	9,9	10,0
4	2,5	10,6	5,0	9,8	4,5	5,2	8,3	8,1
5	2,9	10,6	5,4	10,5	4,8	5,7	9,0	8,8
6	3,0	10,6	5,5	10,7	4,9	5,8	9,2	9,3
7	3,2	10,6	5,7	11,1	5,0	6,1	9,6	9,8
8	3,4	10,6	5,9	11,4	5,2	6,3	9,9	9,6
9	2,5	10,6	5,0	9,8	4,5	5,2	8,3	8,5
10	2,0	10,6	4,5	8,7	4,0	4,4	7,3	7,4
4	2,5	10,2	5,0	9,7	4,4	5,1	8,2	7,9
5	2,9	10,2	5,4	10,.4	4,8	5,6	8,9	8,4
7	3,2	10,2	5,6	10,9	5,0	6,0	9,5	9,5
4	2,5	9,8	4,9	9,5	4,4	5,0	8,1	7,7
5	2,9	9,8	5,3	10,2	4,7	5,6	8,8	8,0
7	3,2	9,8	5,6	10,8	5,0	6,0	9,3	9,2

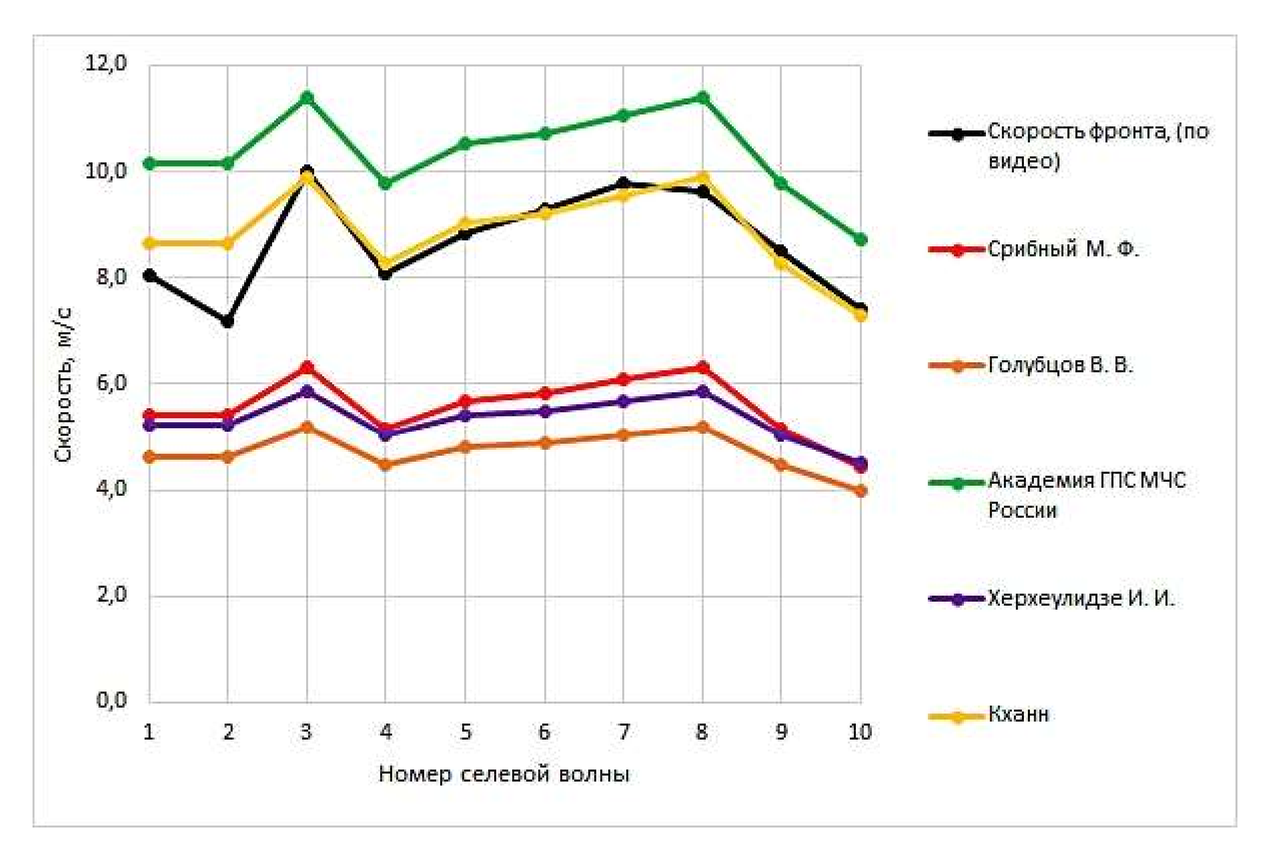


Рисунок 4. Скорости движения селевого потока

Figure 4. The velocity of the debris flow

Результаты расчета скоростей движения селевого потока по разным методикам показали значительный разброс значений. Все использованные формулы выведены эмпирическим путем и включают в себя в основном такие характеристики, как глубина потока и уклон русла.

Например, Херхеулидзе И.И. и Голубцов В.В. выводили формулы расчета скорости движения селевого потока, основываясь на материалах, полученных при обследовании конусов выноса селевых потоков в Грузии и Казахстане соответственно.

Самые высокие значения скорости селевого потока дает формула, предложенная Академией ГПС МЧС России (8,7 м/с – 11,4 м/с). Если использовать данную формулу для определения параметров защитных сооружений, то с экономической точки зрения это будет нецелесообразно.

Формулы Голубцова В.В., Херхеулидзе И.И., Срибного М.Ф. дают заниженные значения скорости селевого потока, в отличие от определенных по видео, разброс значений составляет 2,5 м/с – 4,8 м/с. Использование формул, которые занижают реальные скорости движения селевых потоков, при строительстве защитных сооружений может привести к разрушению селезащитных инженерных сооружений и затоплению территорий.

На графике хорошо видно, что значения скоростей по формуле Кханна близки к значениям, определенным при помощи видеосъёмки. Однако в связи с тем, что в свободном доступе нет информации о теоретическом описании данной методики и о принципах, на которых построена формула Кханна, проверить предположения о степени надежности значений результатов не представляется возможным.

При расчете давления селевого потока на препятствие сравнивались рассчитанные нами значения скорости селя по различным методикам. При расчёте по формуле Гонора А.Л. и Пик-Пичака Е.Г., скорость звука принималась равной 300 м/с, процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте – 0,02, как среднее [Молжигитов, 2016]. Приведены некоторые результаты расчета давления селя на преграду в мегапаскалях (МПа), рассчитанных по скорости, определенной по видеосъемке (рисунок 5).

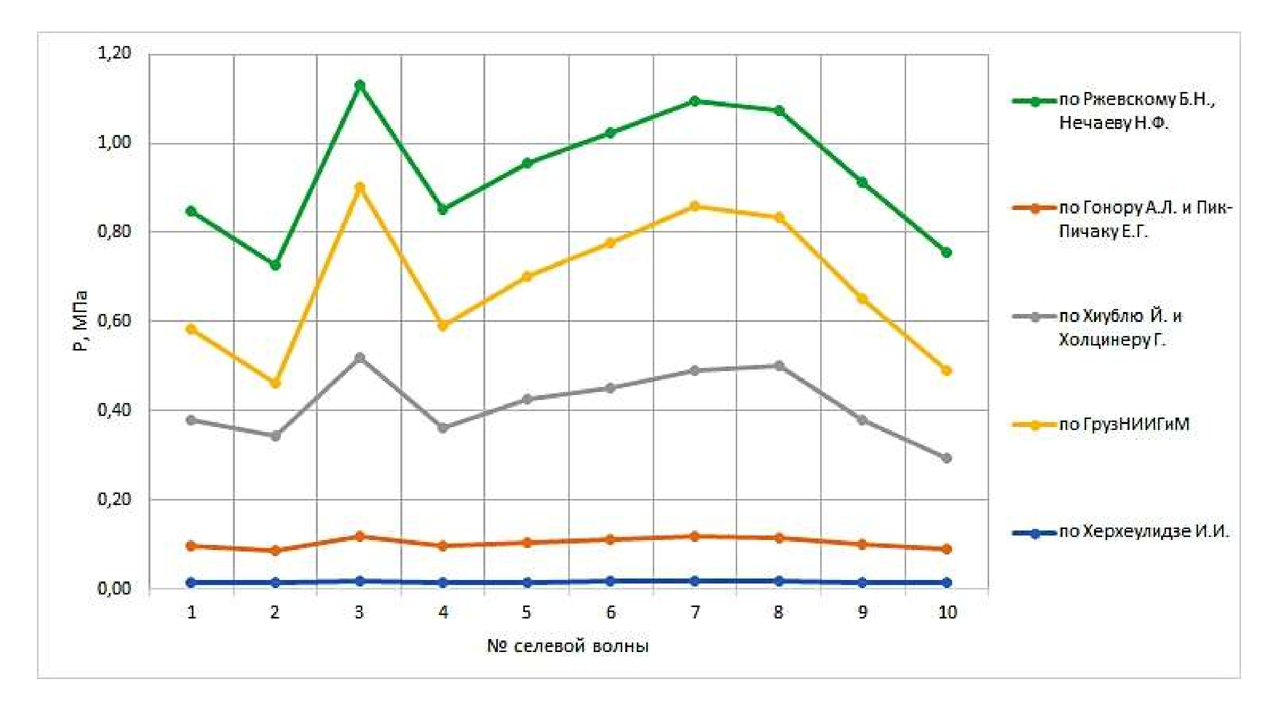


Рисунок 5. Давление селевого потока на преграду

Figure 5. The impact load of mudflow on the obstacle

Расчет давления селя на препятствие по различным методикам также дает большой разброс значений – от 0,014 МПа до 1,13 МПа.

Значения, полученные по формуле Ржевского Б.Н. и Нечаева Н.Ф. колеблются от 0,72 МПа до 1,13 МПа, в то время как значения, полученные по формуле Херхеулидзе И.И., колеблются от 0,014 до 0,019 МПа. Несмотря на то, что формулы Ржевского Б.Н. и Нечаева Н.Ф., Херхеулидзе И.И и формула ГрузНИИГиМ относятся к классу гидродинамических моделей, результаты расчета по данным формулам сильно отличаются.

Формула Гонора А.Л. и Пик-Пичака Е.Г. [Гонор, Пик-Пичак, 1983] относится к классу волновой модели воздействия селевого потока и дает низкие результаты давления по сравнению с другими методиками.

Средние в полученном диапазоне результатов значения нагрузки селя на преграду дала формула Хюбля Й. и Холцинера Г., принадлежащая к классу комбинированной модели гидростатического и гидродинамического воздействия.

Эмпирические коэффициенты использованных формул были выведены лабораторным путем. Кроме этого, в них в основном используются такие характеристики, как плотность селевой массы и скорость потока. По нашему мнению, данные методики не отражают реального давления селевого потока на препятствие. Таким образом, возникает проблема, какую формулу лучше использовать для проектирования селезащитного сооружения.

Заключение

Материалы видеосъёмки грязекаменного селя, сошедшего 4.08.2012 г. по ручью Фиршницбах, позволили:

- измерить скорость потока, которая на разных участках селепропускного канала составляла от 7,2 м/с до 10,0 м/с;
- выделить 10 чётко выраженных селевых волн;
- определить характер движения волн;
- у большинства селевых волн скорость фронта оказывалась выше значений данной характеристики для основного тела волны, наблюдалось растекание селевой массы вдоль бортов бетонированного селепропускного канала;
- у 6 из 10 волн был зафиксирован рост скорости при движении вниз по ступеням канала, однако для получения однозначных выводов о приращении скорости потока вследствие ступенчатой конструкции канала при определенных характеристиках данного явления необходимы дальнейшие исследования.

Анализ имеющихся формул для расчета скорости селевого потока и давления селевой массы на препятствие показал, что самые большие значения скоростей получаются при расчёте по методике, предложенной Академией ГПС МЧС России, при этом разница со скоростями по видео составляла от 0,2 до 3,0 м/с. Расчёт по формулам Голубцова В.В., Херхеулидзе И.И. и Срибного М.Ф. даёт значения скорости селевого потока ниже измеренных

по материалам видеосъёмки. При этом необходимо отметить, что значения скорости, рассчитанные по указанным выше формулам, дают близкие между собой результаты.

Наиболее близкие к значениям скорости по видеосъемке были получены при расчёте по формуле Кханна. Но данная формула включает в себя числовые коэффициенты и две характеристики потока, что и в формулах, упомянутых выше.

Таким образом, полученные результаты по скоростям с одной стороны могут, как уменьшать значения скорости селевого потока (формулы Голубцова В.В., Херхеулидзе И.И., Срибного М.Ф.), так и завышать их (формула Академии ГПС МЧС России). В случае занижения результатов возникает риск разрушения объектов и сооружений, а в случае преувеличения – возникают неоправданные экономические затраты на организацию противоселевой защиты.

Поскольку в методиках расчета давления селя на препятствие используются эмпирические коэффициенты (как и в методиках расчета скорости селя), получение надежных результатов не представляется возможным. Разница в значениях давления селя, полученных при расчёте по различным методикам, колеблется от 0,014 МПа до 1,13 МПа. Наибольшие значения давления были рассчитаны по Ржевскому Б.Н. и Нечаеву Н.Ф. и находятся в промежутке от 0,72 МПа до 1,13 МПа Результаты, полученные по Гонору А.Л. и Пик-Пичаку Е.Г. и Херхеулидзе И.И близки между собой.

Измерение реальных значений скорости селевых потоков по материалам видеосъёмки, размещённых в Интернете, позволяет получить массовый и статистически значимый материал о значениях скорости, волновой динамике и характере движения селевого потока, необходимых для создания физических и математических моделей селя, основанных на реальных значениях его характеристик. Такие модели, в свою очередь, позволят разрабатывать методики расчёта динамических характеристик потока для применения при проектно-изыскательских работах.

Литература

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 144 с.

References

Aulitzky H. The debris flows of Austria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology (Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur)*, 1989, vol. 40, iss. 1, pp. 5-13. DOI: 10.1007/BF02590338

Голубцов В.В. О гидравлическом сопротивлении и формуле для расчета средней скорости течения горных рек // Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 30-41.

Гонор А.Л., Пик-Пичак Е.Г. Численное моделирование удара снежной лавины по твердой стенке // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1983. № 6. С. 86–91.

Казаков Н.А. Волновая динамика селей // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001. № 2. С. 158-164.

Молжигитов С.К. Оценка ударной нагрузки селевого потока на поперечную жесткую преграду // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3 (часть 1). С. 16-20.

Срибный М.Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движению // Исследования и комплексное использование водных ресурсов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 204-220.

Aulitzky H. The debris flows of Austria // Bulletin of the International

Golubtsov V.V. O gidravlicheskom soprotivlenii i formule dlya rascheta srednei skorosti techeniya gornykh rek [About the hydraulic resistance and a formula for calculation of average speed of a current of the mountain rivers]. *Trudy Kazakhskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Transactions of the Kazakh Regional Hydrometeorological Research Institute]*, 1969, no. 33, pp. 30-41. (in Russian).

Gonor A.L., Pik-Pichak E.G. Chislennoe modelirovanie udara snezhnoi laviny po tverdoi stenke [Numerical modeling of snow avalanche impact on a solid wall]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza [News of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of fluid and gas],* 1983, no. 6, pp. 86–91. (in Russian).

Hübl J. Event documentation, Volume 3: Annual review of events. *IAN Report 150.* Vienna, February 2013, 88 p. (in German).

Kazakov N.A. Volnovaya dinamika selei [Wave dynamics of debris flows]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology],* 2001, no 2, pp. 158-164. (in Russian).

Molzhigitov S.K. Otsenka udarnoi nagruzki selevogo potoka na poperechnuyu zhestkuyu pregradu [Estimation of the impact load of the mudflow on the transverse rigid barrier] *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii [International journal of applied and fundamental research],* 2016, no. 3 (part 1), pp. 16-20. (in Russian; abstract in English).

Sribnyi M.F. Formula srednei skorosti techeniya rek i ikh gidravlicheskaya klassifikatsiya po soprotivleniyu

Association of Engineering Geology (Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur). 1989. Volume 40. Issue 1. P. 5–13. DOI: 10.1007/BF02590338

Hübl J. Ereignisdokumentation, Band 3: Jahresrückblick der Ereignisse. IAN Report 150. Wien, Februar 2013, 88 p.

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin // Natural Hazards. 2017. Vol. 88. Suppl. 1. PP. 189-198. DOI: 10.1007/s11069-017-2853-z

dvizheniyu [Formula of the average flow velocity of rivers and their hydraulic classification by resistance to the movement] *Issledovaniya i kompleksnoe ispol'zovanie vodnykh resursov [Researches and complex use of water resources].* Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Science, 1960, pp. 204-220. (in Russian).

Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (in Russian).

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y., 2017. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin. *Natural Hazards,* Vol. 88, No. 1, pp. 189-198. DOI: 10.1007/s11069-017-2853-z

УДК 551.4.042

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ РЕЖИМА ПАВОДКОВОГО СТОКА РЕКИ УССУРИ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ ДО КОНЦА XXI ВЕКА

Б.И. Гарцман[1, 2], С.Ю. Лупаков[1,2]

[1] *Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*

[2] *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия*

gartsman@inbox.ru

Аннотация. Определение реакции речных систем на климатические изменения является одной из ключевых проблем современной гидрологии. Тем более это касается Дальнего Востока России, режим увлажнения которого известен своей неустойчивостью. В настоящей статье представлены результаты оценки изменения характеристик паводкового стока рек бассейна Уссури при ожидаемых изменениях климата, связанных с глобальным потеплением.

Оценки выполнены на основе схемы динамико-стохастического моделирования, при которой на вход в гидрологическую модель подаются многочисленные ряды синтетических осадков, для перебора всевозможных условий увлажнения на водосборе. Для расчетов стока использовалась региональная гидрологическая модель паводочного цикла малого речного бассейна, ориентированная

ASSESSMENT OF THE USSURI RIVER FLOOD REGIME CHANGES REGARDING TO CLIMATE PROJECTIONS TO THE END OF THE XXI CENTURY

Boris I. Gartsman[1, 2], Sergei Yu. Lupakov[1,2]

[1] *Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia*

[2] *Pacific Geographical Institute of FEB RAS, Vladivostok, Russia*

gartsman@inbox.ru

Abstract. Detecting reaction of river systems to climate changes is one of the key problems in modern hydrology. Moreover, this is the case of the Far East of Russia, where moisture regime variability is well known. The presented article deals with the assessment results of changes in the flood characteristics of the Ussuri river and its tributaries under the expected climate changes, linked with global warming. The estimates are based on dynamic-stochastic modeling scheme, in which numerous synthetic precipitation series are input to the hydrological model for searching of all kinds of humidification conditions at the investigated catchments. There was used a regional hydrological Flood

Gartsman B.I., Lupakov S.Yu. Assessment of the Ussuri river flood regime changes regarding to climate projections to the end of the XXI century. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 52-70 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.006

на описание процессов формирования стока летне–осеннего паводкового периода. Для задания климатического сценария использовалось объединение регионализированной стохастической модели осадков и данных расчетов по глобальным моделям климата (GCM) на последнюю треть XXI века (2071–2100 гг.).

Показано, что увеличение осадков приводит к непропорциональному отклику в исследуемых характеристиках максимального стока теплого периода года. При этом относительный рост норм максимальных расходов за сезон достигает 4–5 раз, а норм суммарного слоя стока – 2–3 раз в зависимости от варианта расчета с совмещением различных климатических моделей и сценариев. Полученные результаты согласуются с анализом данных наблюдений на основе использования так называемого «коэффициента эластичности», а также с проведенными ранее исследованиями. Таким образом, при климатических изменениях можно предполагать рост паводковой опасности в исследуемом регионе.

Ключевые слова: динамико-стохастическое моделирование; бассейн Уссури; изменения климата; климатические сценарии; глобальные климатические модели

Cycle Model of small river basin that focuses on the description of runoff formation processes in the summer–autumn flood period. Climate changes input is based on the integration of the regional stochastic rainfall model and General Circulation Models (GCM) data to the end of XXI century (2071–2100).

It is shown that an increase in precipitation sum leads to an unproportional response of the evaluated flood flow characteristics. The relative increase in the mean values of the maximum flow reaches 4–5 times and 2–3 times for the seasonal runoff depth depending on applied GCM and climate scenarios. The obtained results are consistent with the analysis of observational data using the “elasticity coefficient” and previous investigations. Therefore, flood risks could be expected at the investigated territory due to climate changes.

Keywords: dynamic-stochastic modeling; the Ussuri river; climate changes; climate projections; General Circulation Models

Введение

Глобальные климатические изменения в настоящее время рассматриваются как факт, не подлежащий сомнению [IPCC, 2013], чему способствует большое количество исследований по тематике. Однако последствия быстрой смены климатических условий изучены в объеме меньшем, на который можно рассчитывать, принимая во внимание глобальный характер

вопроса. В отношении речного стока данная проблема не менее актуальна, поскольку изменения в климатической системе, вызываемые глобальным потеплением, могут приводить к значительным трансформациям режима увлажнения территорий [IPCC, 2013]. Учитывая возможность усиления мелкомасштабных эффектов на локальном уровне, изучение гидрологических последствий регионального характера приобретают дополнительную ценность.

В контексте обсуждаемой проблемы юг Дальнего Востока является достаточно сложным объектом. Это обусловлено особенностями геологического строения, ландшафтной структурой водосборов, слабым информационным обеспечением территории, чрезвычайной пространственной и временной изменчивостью процессов стокоформирования. Следует также упомянуть, что верховья крупных рек, на которые в настоящей работе сделан акцент, рассматриваются как наиболее уязвимые к климатическим изменениям [Bales et al., 2006; Zhang et al., 2016, Wu et al., 2018].

Ранее проведенное исследование [Gartsman, Lupakov, 2018] показало, что, при моделировании паводкового стока в рамках климатических проекций, в первом приближении можно ограничиться учетом осадков и испарения. Поэтому расчет режима стока выполняется на основе сценариев изменений этих двух климатических переменных.

Объекты исследования

Объектом исследования является бассейн р. Уссури с замыкающим створом у п. Кировский, в пределах которого выделены пять малых речных бассейнов (Рисунок 1, Таблица 1), рассматриваемых в качестве бассейнов–индикаторов в рамках ранее отработанной модели паводкового стока [Gartsman, Lupakov, 2017].

Климат региона – муссонный, особенностью которого является неустойчивый режим увлажнения. Нормы годовых осадков лежат в пределах 600–700 мм, 80% и более которых выпадают в виде дождей в теплый период года. Суточные максимумы осадков достигают 100-200 мм. Питание рек соответствует дальневосточному типу, с преобладанием дождевого. Основной фазой гидрологического режима можно считать летние паводки, на которые в отдельных случаях приходится до 80% и более годового стока. Рельеф среднегорный, стокоформирущие области бассейна большей частью находятся на высотах от 500 м и более. Геологическое строение разнообразно и связано с процессами формирования Сихотэ-Алиньский складчатой области. Почвенно–растительный покров представлен в основном смешанными хвойно–широколиственными лесами и лесными бурозёмами.

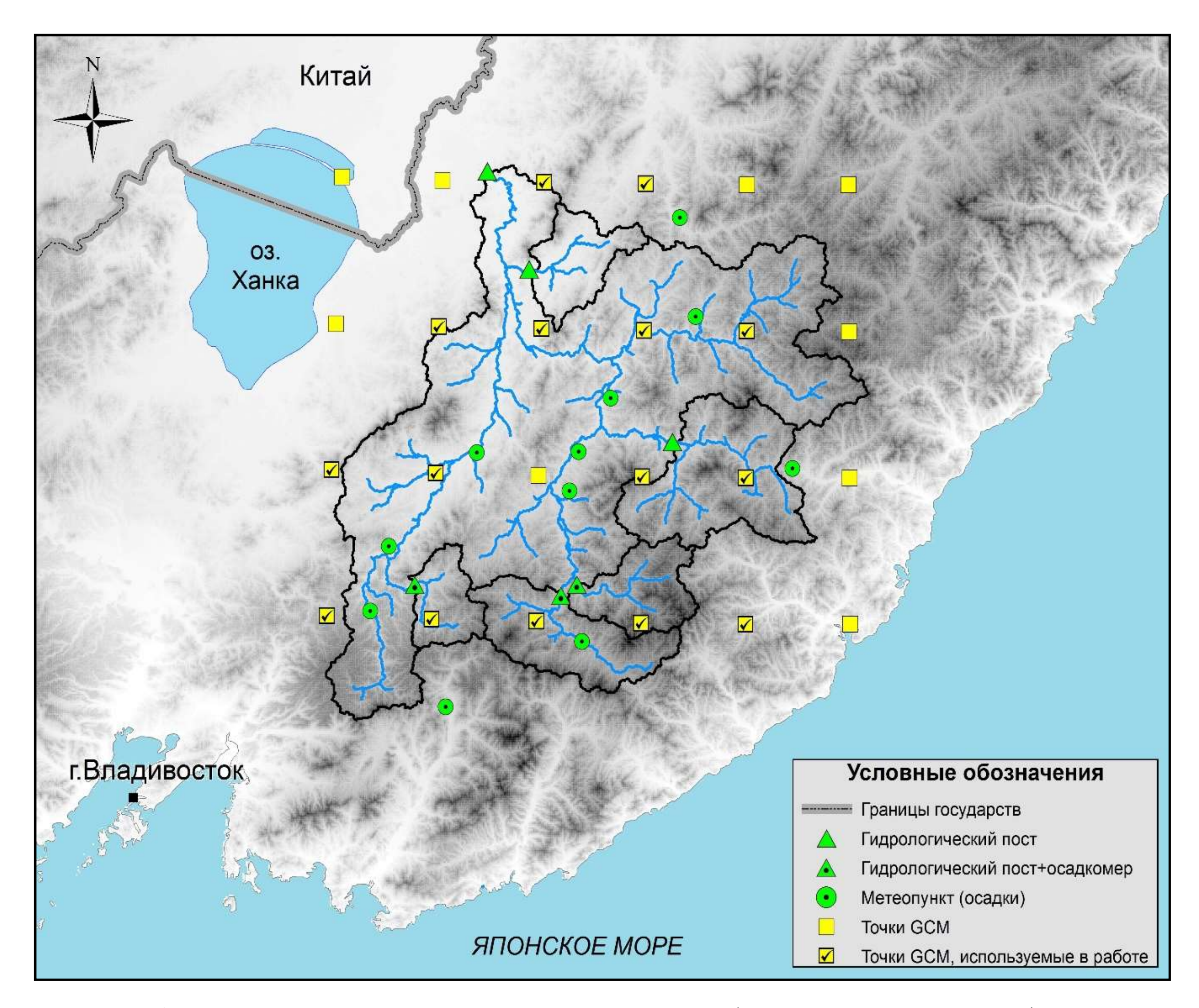


Рисунок 1. Картосхема расположения исследуемых бассейнов, пунктов наблюдений и использованных узлов расчетной сетки GCM

Figure 1. Schematic layout of the studied basins, rain gauge stations and used grid points of GCM

Таблица 1. Характеристика объектов и используемые данные

Table 1. Characteristics of the studied objects and used data

Гидрологические посты (бассейны)						
№ п/п	Река – пункт	Площадь, км^2	Высота ср., м	Уклон ср., м/100 м	Леси-стость, %	Годы наблюде-ний
1	Уссури – Верх-няя Бреевка	1160	836	0,25	91	1954–1995, 1999–2013
2	Извилинка – Из-вилинка	1720	752	0,21	99	1955–1995, 1998–2013
3	Муравейка – Гродеково	2670	623	0,12	98	1970–2013
4	Крыловка – Крыловка	761	592	0,18	99	1953–2013
5	Павловка – Ан-тоновка	1070	251	0,11	82	1948–2013
6	Уссури – Киров-ский	24400	474	0,10	84	1953–2013

Метеорологические станции и посты				
№ п/п	Метеопункт	Норма осадков за год, мм	Высота, м	Годы наблюдений
1	Виноградовка	655	110	1951–2014
2	Верхняя Бреевка	642	–	1947–2014
3	Гродеково	700	170	1952–2014
4	Молчановка	677	–	1951–2014
5	Ясное	672	–	1940–2014
6	Каменка	672	210	1947–2014
7	Чугуевка	694	257	1949–2014
8	Самарка	687	319	1981–2014
9	Кокшаровка	629	170	1948–1996, 1998–2014
10	Извилинка	691	338	1960–2014
11	Варфоломеевка	675	129	1960–2014
12	Ариадное	731	124	1951–2014
13	Кавалерово	659	265	1936–2014

Методика исследования

Как было показано ранее [Виноградов, 1988; Гельфан, 2007; Gartsman, Lupakov, 2017], динамико–стохастическое моделирование представляет собой эффективный подход к расчету стоковых характеристик, в том числе в условиях меняющегося климата. Он основан на объединении двух подмоделей – стохастическая модель погоды подает последовательность метеоэлементов на вход гидрологической модели, выход которой затем конфигурируется в виде кривых обеспеченности стоковых характеристик.

В качестве гидрологической компоненты использовалась региональная модель паводочного цикла малого речного бассейна (Flood Cycle Model, FCM) [Гарцман, 2008], разработанная для режима с преобладанием дождевых паводков и многократно тестированная как на российских, так и зарубежных данных [Chen, Lee, Gartsman, 2008; Belyakova, Gartsman, 2018]. Модель включает небольшое количество параметров, большая часть из которых определяется на основе анализа рядов гидрометеорологических измерений, и демонстрирует хорошее и удовлетворительное качество работы – коэффициент Нэша-Сатклиффа при испытаниях на 36–ти малых реках Приморского края составил 0,64-0,91. Относительно низкие оценки качества в основном связаны с маловодными периодами, в то время как паводки в подавляющем количестве случаев имитируются с большой точностью, в соответствии с идеологией модели.

Применение FCM ограничивается размерами исследуемых бассейнов – их площадь не должна превышать первые тысячи км^2. Для воспроизведения и прогнозирования стока более крупных рек используется схема моделирования с бассейнами–индикаторами, в качестве которых используются малые репрезентативные речные бассейны, отражающие особенности процессов стокоформирования на определенной площади водосбора бóльшего размера. Процесс добегания стока по речной сети с бассейнов–индикаторов моделируется на основе схемы Калинина–Милюкова, после чего все гидрографы суммируются в замыкающем створе с соответствующими весовыми коэффициентами. Параметры как FCM, так и расчетной схемы определены ранее в процессе независимой параметризации и на основе калибровки. Более подробное описание приведено в [Гарцман, 2008; Гарцман, Губарева, 2007]. Разработанные на основе описанных моделей методики краткосрочного прогноза гидрографов рек бассейнов Уссури и Буреи используются продолжительное время в региональных подразделениях Росгидромета и показывают убедительные результаты в условиях недостаточного информационного обеспечения.

Так как на выходе схемы динамико–стохастического моделирования необходимо получить кривые обеспеченности стоковых характеристик, вычислительные эксперименты выполнялись по следующему алгоритму [Gartsman, Lupakov, 2018]. На вход в стоковую модель подавались многолетние последовательности модельных суточных осадков, в результате чего формировались длительные ряды смоделированных максимальных расходов за сезон с июня по сентябрь (Q_{max}, мм/сут) и суммарного слоя стока за тот же сезон ($W_{VI–IX}$, мм). Из таких рядов формировались по 200 выборок обеих характеристик такой же длины, которая имелась для каждого бассейна по фактическим данным о стоке. Для получения такого количества информации выполнялся расчет условных 15000 паводкоопасных сезонов (1 июня–30 сентября). Начальные условия для расчетов при этом задавались стохастически. Затем все выборки стоковых характеристик ранжировались и осреднялись по рангам. Модельной кривой при этом считалась осредненная, а наличие 200 выборок дало возможность построения доверительных интервалов кривых обеспеченности на уровнях надежности 5–95 и 1–99%.

Климатический вход в гидрологическую модель

Современные глобальные климатические модели (GCM)

В качестве основы для представления будущего состояния режима осадков использовались данные расчетов по 5 глобальным климатическим моделям (GCM) с использованием 4 климатических сценариев семейства RCP из проекта ISI–MIP [Warszawski et al., 2014], который подразумевает расчет климата будущего (на 2006–2100 гг.) и за «исторический период» (1961–2004). Подробное описание структуры и алгоритмов моделей можно найти на портале https://pcmdi.llnl.gov/ или в соответствующих публикациях [Watanabe et al., 2011; Jones et al., 2011; Dunne et al., 2012; Dufresne J.–L. et al., 2013; Bentsen et al., 2013]. В сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, связанных с различными сценариями развития общества, числа в обозначениях соответствуют увеличению суммарной величины радиационного воздействия (в Вт/м^2) к 2100 г. по сравнению с 1750 г. [van Vuuren et al., 2011].

Расчетные данные GCM по осадкам даны в узлах прямоугольной сетки с шагом в 0,5 градуса по долготе и широте. Водосбор р. Уссури – п. Кировский полностью покрывается 24 точками (Рисунок 1). В настоящей работе использовались те, которые либо находятся в пределах обсуждаемых малых речных водосборов, либо в непосредственной близости. Таким образом, применение данных глобальных моделей для построения ансамблевого прогноза в

нашем случае подразумевает проведение 21 расчета (5 моделей х 4 сценария и один ансамблевый) для каждого водотока.

Для приведения данных к региональному масштабу была проведена процедура так называемого «даунскейлинга» (англ. – «downscaling») [Trzaska, Schnarr, 2014]. В настоящей работе был использован вариант так называемого delta change method, который состоит в формировании синтетических рядов метеорологических данных, основанных на введении в фактические ряды специальным образом определенной постоянной поправки («дельты»). Это было выполнено следующим образом. Были рассчитаны нормы осадков на последнюю треть XXI века (2071–2100) по модельным данным (20 вариантов, 5 GCM х 4 сценария RCP) и отнесены к расчетным нормам по тем же GCM за «исторический период», в результате определены 20 «дельт». Упомянутый временной интервал был выбран исходя из вида прогнозируемых траекторий сценариев семейства RCP – примерно до 2030 года их характеристики различаются не сильно, а более заметная разница относится ко второй половине XXI века. Диапазон изменения относительно текущего климата в таком случае составил от 116% (модель – GFDL, сценарий RCP 2.6) до 130% (модель – NorESM, сценарий RCP 8.5) суммарных осадков за сезон по отношению к сезонной норме, рассчитанной по историческим данным. Далее эта поправка («дельта», в %) вносилась в стохастическую модель осадков при разыгрывании среднесуточной нормы синтетического ряда.

Стохастическая модель осадков

Моделирование осадков в рамках описанной проекции было выполнено с помощью регионально адаптированной версии пространственно распределенного генератора погоды SFRWG (Spatial–FRagment Weather Generator) [Гельфан, Морейдо, 2015]. Данная разработка способна непрерывно моделировать несколько метеорологических переменных. В настоящей работе она была упрощена до стохастической модели осадков по группе станций, алгоритм которой включает следующие этапы: для набора метеопунктов, совокупность которых с необходимой полнотой покрывает исследуемый бассейн, высчитывается среднесуточное значение за каждый сезон. Далее каждое суточное значение осадков каждого метеопункта делится на эту норму, тем самым получается набор модульных коэффициентов, а каждый год с таким набором рассматривается как «фрагмент», который фиксирует определенную метеорологическую обстановку, состояние погоды. Количество таких «фрагментов» соответствует числу лет совместных наблюдений используемых метеопунктов. Для моделирования среднесуточное значение осадков каждого сезона разыгрывается на основе

датчика случайных чисел, затем случайным образом выбирается «шаблон» и модельные ряды каждого пункта наблюдений восстанавливается по модульным коэффициентам.

В рамках данной работы было выполнено усовершенствование стохастической модели осадков путем учета того обстоятельства, что характер распределения дождей в сухие и увлажненные сезоны должен существенно различаться. Наиболее естественный вариант такого учета – использование классификации метеорологических ситуаций летне–осеннего периода. Однако подобных метеорологических классификаций столь длительных периодов для исследуемого региона не разработано, поэтому была использована известная гидрологическая классификация типов внутригодового распределения стока рек юга Дальнего Востока [Гарцман, Лыло, Черненко, 1974], включающая 4 типа:

- тип А, характеризуется преобладанием весеннего стока, отсутствием сильных паводков в остальную часть года;
- тип Б, которому соответствует приблизительное равенство объема стока весны и лета, которые разделены фазой пониженной водности;
- тип В, при котором отмечается 1–2 сильных паводка летне–осеннего периода;
- тип Г, появление которого сопровождается паводочным режимом стока в течении всего теплого периода.

Наше предположение состояло в том, что определенному гидрологическому типу соответствует определенная метеорологическая ситуация отдельного года, что дает возможность применить к осадкам гидрологическую классификацию. Анализ количества осадков, измеренное на различных станциях региона, подтвердил эту гипотезу, так как в годы, при которых наблюдались типы А и Б, выпадало осадков систематически меньше, чем при типах В и Г. Соответственно, типы А и Б были объединены в общий (условно названный «маловодный») тип АБ, а типы В и Г были объединены в общий (условно названный «многоводный») тип ВГ. Совместный ряд наблюдений для всех метеопунктов в пределах бассейна составил 48 лет (сезонов) или «фрагментов», распределение типов в наблюденных годах составило 1:1 (24 типа АБ на 24 типа ВГ). Учет данной версии классификации в модели осадков был произведен следующим образом. При разыгрывании модельного среднесуточного значения осадков, оно сравнивалось с нормой фактических осадков. Если модельная норма оказывалась больше фактической, выбирался «фрагмент» типа ВГ, в обратном случае – АБ. Такая корректировка генератора осадков практически не сказалась на сезонной норме осадков, однако максимальные суточные осадки стали моделироваться точнее в основном в зоне малых обеспеченностей (Рисунок 2, а, б).

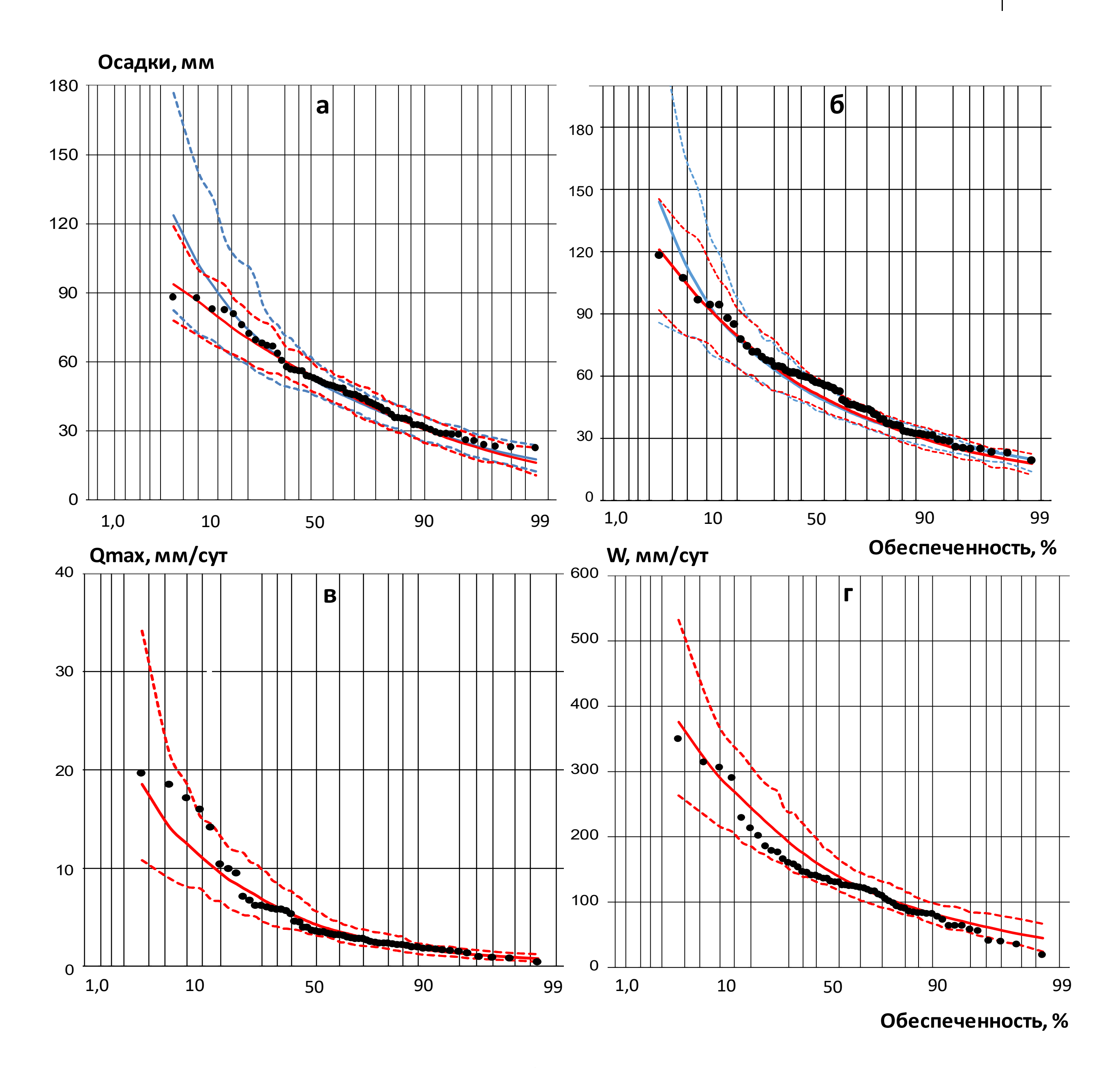


Рисунок 2. Примеры модельных кривых обеспеченности (красный цвет – с использованием усовершенствованной версии модели осадков, синий цвет – с исходной):

а, б – максимальных суточных осадков по пунктам Ясное, Верхняя Бреевка, соответственно;

в – Q_{max}, г – $W_{VI–IX}$ по створу р. Уссури – п. Кировский.

Figure 2. Examples of calculated probability curves of (red colour – using the upgraded rainfall model, blue colour – using initial version):

а, б – maximum daily precipitation for Yasnoe rain gauge station, the same for Verknyaya Breyevka respectively;

в – maximum daily runoff, г – total runoff depth for the Ussuri-Kirovskiy outlet.

Пример итоговых получаемых кривых обеспеченности для замыкающего створа на «историческом» климате р. Уссури – п. Кировский представлен на Рисунке 2 (в, г). Заметно, что большая часть точек, в том числе и в зоне низких обеспеченностей, находятся в пределах достаточно жёсткого 98% доверительного интервала.

Факт повышения точности расчета осадков по усовершенствованной версии стохастической модели сказался и на стоковых характеристиках при моделировании за «исторический период». В итоге, по всей совокупности объектов, при моделировании Q_{max} в границы оцененного доверительного интервала 98% обеспеченности попадает 88% эмпирических точек, а при отбрасывании нижнего квартиля распределения – 97%. При моделировании $W_{VI–IX}$ в границы доверительного интервала 98% обеспеченности попадает 93% эмпирических точек, при отбрасывании нижнего квартиля 99% эмпирических точек.

Дополнительно было учтено возможное изменение испарения на расчетный период. Был вычислен тренд в рядах приземной температуры по всем используемым метеопунктам, и пересчитан в рост потенциального испарения по формуле Л. Одина [Oudin, 2005a]. Установлено, что наблюдаемый рост температур для летне–осеннего сезона вызовет рост испарения не более чем на 10% относительно текущих условий. Отметим, что чувствительность FCM к изменению испарения достаточно низкая – в пределах 10–15% от общей чувствительности к изменениям исходных данных, начальных условий расчетов и параметров модели [Gartsman, Lupakov, 2018]. Целый ряд трудностей не позволяет учесть рост испарения максимально точно, начиная с отсутствия массовых данных, заканчивая способностью моделей в принципе усваивать внедряемые методы расчета [Oudin, 2005b].

В итоге, проекционный расчет стока на последнюю треть XXI века предполагает рост нормы осадков от 16% до 30% и увеличение нормы потенциального испарения на 10% относительно текущего климата.

Результаты численных экспериментов по расчету стока

Используя многолетние ряды синтетических осадков, нами был проведен расчет гидрографов стока по всем малым рекам и замыкающему створу р. Уссури – п. Кировский по описанной выше методике. Учитывая ранее проведенные исследование [Gartsman, Lupakov, 2017], ожидался существенно больший относительный рост норм стоковых характеристик относительно изменения в нормах осадков. В целом, данное предположение подтвердилось (Рисунок 3). Нормы Q_{max} изменяются в пределах от 131% до 264% по сравнению с нормами «исторического периода», нормы $W_{VI–IX}$ – соответственно, от 124% до 163%. Сценарный рост

норм сезонных осадков существенно меньше, отношения роста отклика гидрологических характеристик на рост входного воздействия (все в %) в некоторых вариантах расчетов достигает 5 раз и более.



Рисунок 3. Связь изменения норм осадков (моделированные/«исторический» период – по оси абсцисс) с изменениями характеристик стока (моделированный/«исторический» период – по оси ординат). Каждой точке соответствует вариант расчета с различным сочетанием GCM и RCP на период с 2071 по 2100 гг., а также ансамблевый расчет (всего 21 расчет для каждого объекта). Цветом обозначены разные бассейны, нумерация – как в Таблице 1.

Figure 3. Relation between changes of mean precipitation (modeled/"historical" – X-axis) and flow characteristics (modeled/"historical" – Y-axis). Each point represents calculation with applying of different GCM and RCP for 2071-2100 and ensemble one (in total 21 for each objects). Different color marks different objects with numbering as presented in Table 1.

Физическое объяснение этого факта, по–видимому, состоит в том, что при увеличении валового количества осадков, потери различного рода (на заполнение бессточных понижений, полостей внутри почвы и т.п.) относительно сокращаются, а коэффициент стока существенно возрастает. В используемой гидрологической модели это достигается за счет существования двух различных режимов стокоформирования. При первом сток образуется за счет подповерхностного движения влаги, то есть достаточно медленно, и со значительной долей потерь; при втором – формируется 100%–й поверхностный сток. Увеличение частоты и продолжительности действия второго режима стокоформирования при увеличивающемся количестве осадков резко усиливает бассейновый отклик.

С точки зрения формирования паводков и опасностей, связанных с ними, интересны значения стоковых характеристик различной обеспеченности. Рассмотрим значения квантилей 1% и 5% обеспеченности максимального расхода Q_{max}, которые также демонстрируют заметный рост. Рисунок 4 отражает отношение Q_{max} 1%-ой обеспеченности, полученных в отдельных вариантах расчетов, к рассчитанному за «исторический период». В ряд выстроены 21 вариант расчета, соответствующих различным сочетаниям моделей и сценариев (5 GCM x 4 RCP + 1 ансамблевый).

Видно, что по всем вариантам расчетов события, происходящие раз в 100 лет, становятся более масштабными – рост отмечается на уровне от 19% до 86% относительно «исторического периода». В другой формулировке, при рассматриваемых сценариях существенно возрастают вероятности прохождения паводков с некоторыми фиксированными значениями максимальных расходов. В то же время динамика, например, модельных оценок $W_{VI–IX}$ 5% обеспеченности отличается от Qmax в сторону относительно меньшего роста и большего разброса между разными бассейнами реками – для замыкающго створа р. Уссури – п. Кировский изменение $W_{VI–IX}$ 5% обеспеченности относительно текущего климата практически отсутствует.

Заключение

Очевидно, что степень доверия получаемым оценкам гидрологического характера в первую очередь определяется качеством работы климатических моделей. На текущий момент, примененные решения в области получения модельных осадков рассматриваются как наиболее правдоподобные, с учетом всех ограничений, на последнюю треть XXI в.

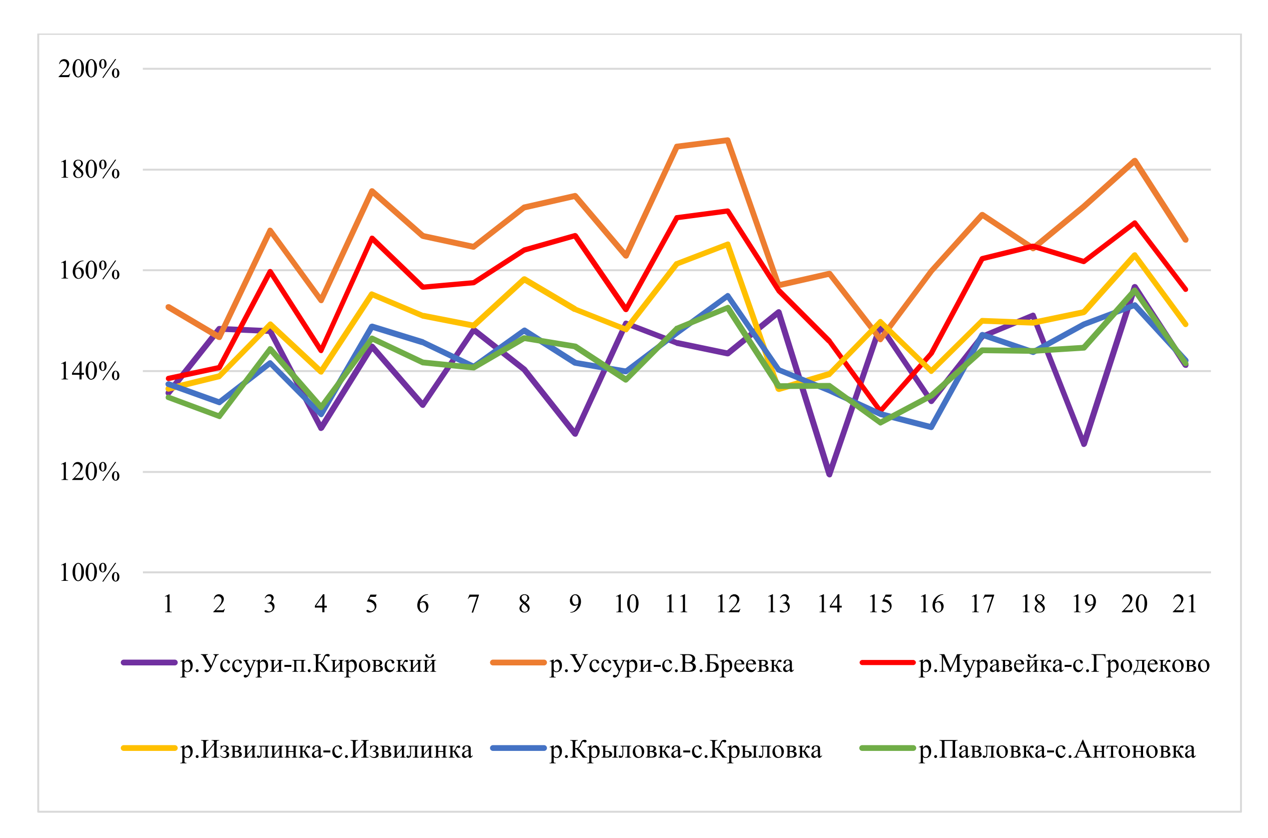


Рисунок 4. Изменение значений максимальных расходов 1% обеспеченности относительно текущих условий по различным вариантам расчета на период 2071–2100 гг. на всех используемых створах

Figure 4. Changes of the maximum daily runoff values of 1% occurrence probability against present conditions with respect to the period of 2021-2100 at the studied objects

Выполненные расчеты для водосборов дальневосточных рек с использованием различных источников климатического входа в стоковую модель показывают сложную динамику взаимодействия основных элементов водного баланса. При этом нормы исследуемых стоковых характеристик растут весьма значительно, превышая в относительном (процентном) выражении ожидаемый рост осадков. Полученные оценки указывают на существенное увеличения паводковой опасности в регионе. Эта тенденция прослеживается и при анализе фактических данных. Например, в зарубежной практике популярным инструментом для этого является коэффициент «эластичности» стока по осадкам [Sankarasubramanian, Vogel, Limbrunner, 2001]:

$$*\varepsilon(P,Q) = median\left(\frac{Q_t - \overline{Q}}{P_t - \overline{P}} * \frac{\overline{P}}{\overline{Q}}\right) \quad (1),$$

где Q_t – суммарный слой стока за конкретный сезон,

P_t – сумма осадков за тот же период,

$\overline{Q}$ и $\overline{P}$ соответствующие многолетние нормы.

Данный показатель отражает изменение выбранной характеристики стока в ответ на 1% изменения осадков. По результатам его применения для нескольких малых речных бассейнов в пределах бассейна р. Уссури – п. Кировский за период от начала 1950–х до 2013 г. этот коэффициент принимает значения от 1,2 до 3,3. Таким образом, полученные оценки при использовании методов моделирования и анализа фактического материала близки или, как минимум, одного порядка.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект № 17-77-3006 и РФФИ № 19-05-00326.

Acknowledgments

This study was supported by the Russian Science Foundation, project no. and 17-77-30006, and by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-05-00326.

Литература

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 311 с.

Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 421 с.

Гарцман Б.И. Губарева Т.С. Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. с. 70-80.

Гарцман И.Н. Лыло В.М. Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 264 с.

References

Bales R., Molotch N., Painter Th., Dettinger M., Rice R., Dozier J. Mountain hydrology of the western United States. *Water Resources Research*, 2006, vol. 42, iss. 8, W08432. DOI: 10.1029/2005WR004387

Belyakova P.A. Gartsman B.I. Possibilities of Flood Forecasting in the West Caucasian Rivers Based on FCM Model. *Water Resources*, 2018, vol. 45, suppl. 1, pp. 50-58. DOI: 10.1134/S0097807818050317

Bentsen M. et al. The Norwegian Earth system model, NorESM1-M - Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*, 2013, vol. 6, pp. 687-720. DOI: 10.5194/gmdd-5-2843-2012

Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: ИВП РАН, 2007. 294 с.

Гельфан А.Н. Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лёд и Снег. 2015. Т.55. № 4. с. 61-72.

Bales R., Molotch N., Painter Th., Dettinger M., Rice R., Dozier J. Mountain hydrology of the western United States // Water Resources Research. 2006. V. 42. Iss. 8. W08432. DOI: 10.1029/2005WR004387

Belyakova P.A. Gartsman B.I. Possibilities of Flood Forecasting in the West Caucasian Rivers Based on FCM Model // Water Resources. 2018. V. 45 (Suppl. 1). P. 50-58 DOI: 10.1134/S0097807818050317

Bentsen M. et al. The Norwegian Earth system model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate // Geoscientific Model Development. 2013. Vol. 6. P. 687-720. DOI: 10.5194/gmdd-5-2843-2012

Chen N.Ch. Lee K.T. Gartsman B.I. Application of Flood Cycle Model for daily flow simulating in different climate area // Taiwan Water Conservancy. 2008. Vol. 56. No. 2. P. 1-13.

Chen N.Ch. Lee K.T. Gartsman B.I. Application of Flood Cycle Model for daily flow simulating in different climate area. *Taiwan Water Conservancy*, 2008, vol. 56, no 2, pp. 1-13.

Dufresne J.-L. et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 2013, vol. 40, iss. 9-10, pp. 2123-2165. DOI: 10.1007/s00382-012-1636-1

Dunne J. et al. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, no. 19, pp. 6646-6665. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00560.1

Gartsman B.I. *Dozhdevye navodneniya na rekah Dalnego Vostoka: metody raschetov, prognozov, otsenki riska [Rainfall Floods in the Rivers of the Far East: Calculation, Forecasting, and Risk Assessment Methods].* Vladivostok: Publ. Dalnauka, 2008. 421 p. (In Russian)

Gartsman B.I. Gubareva T.S. Prognoz gidrografa dozhdevyh pavodkov na rekah Dal'nego Vostoka [Forecast of the rainfall flood hydrograph on the Far East rivers] // *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and hydrology (Russia)]*, 2007, no. 5, p. 70-80. (In Russian; abstract in English)

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur Basin: Estimation based on dynamic-stochastic simulation. *Water Resources*, 2017, vol. 44, iss. 5, pp. 697-706. DOI: 10.1134/S0097807817050062

Dufresne J.-L. et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5 // Climate Dynamics. 2013. V. 40. Iss. 9-10. P. 2123-2165. DOI: 10.1007/s00382-012-1636-1

Dunne J. et al. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics // Journal of Climate. 2012. Vol. 25. No. 19. P. 6646-6665. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00560.1

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur Basin: Estimation based on dynamic-stochastic simulation // Water Resources. 2017. Vol. 44. Iss. 5. P. 697-706. DOI: 10.1134/S0097807817050062

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Changes in the maximum runoff regime in the Ussuri River basin: the methodological aspects of forecasting based on dynamic-stochastic simulation // Water Resources. 2018. Vol. 45. Suppl. 1. P. S79-S89.
DOI: 10.1134/S0097807818050342

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge,

Gartsman B.I. Lupakov S.Yu. Changes in the maximum runoff regime in the Ussuri River basin: the methodological aspects of forecasting based on dynamic-stochastic simulation. *Water Resources*, 2018, vol. 45, suppl. 1, pp. S79-S89. DOI: 10.1134/S0097807818050342

Gartsman I.N. Lylo V.M. Chernenko V.G. *Pavodochnyj stok rek Dal'nego Vostoka [Flood flow of the Far Eastern rivers]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971. 264 p. (In Russian)

Gelfan A.N. *Dinamiko-stohasticheskoye modelirovaniye formirovaniya talogo stoka [Dynamic—Stochastic Simulation of Snowmelt Runoff Formation]*. Moscow: Publ. of Institute of Water Problems RAS, 2007. 294 p. (In Russian)

Gelfan A.N. Moreydo V.M. Opisanie makromasshtabnoj struktury polja snezhnogo pokrova ravninnoj territorii s pomoshh'ju dinamiko-stohasticheskoj modeli ego formirovanija [Describing macro-scale structure of the snow cover by a dynamic-stochastic model]. *Led i sneg [Ice and snow (Russia)]*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 61-72. (In Russian; abstract in English)

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and

United Kingdom and New York. 2013. 1535 p.

Jones C.D. et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations // Geoscientific Model Development. 2011. Vol. 4. Iss. 3. P. 543-570. DOI: 10.5194/gmd-4-543-2011

Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling // Jornal of Hydrology. 2005a. Vol. 303. Iss. 1-4. P. 290-306. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Oudin L. Michel C. Anctil F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? // Jornal of Hydrology. 2005b. Vol. 303. Iss. 1-4. P. 275-289 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.025

Sankarasubramanian A., Vogel R.M., Limbrunner J.F. Climate elasticity of streamflow in the United States // Water Resources Research. 2001. Vol. 37. Iss. 6. P. 1771-1781. DOI: 10.1029/2000WR900330

Trzaska S. Schnarr E. A review of downscaling methods for climate change projections (Technical report, United States Agency for

New York, Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

Jones C.D. et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, 2011, vol. 4, iss. 3, pp. 543-570. DOI: 10.5194/gmd-4-543-2011

Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Jornal of Hydrology*, 2005a, vol. 303, no. 1-4. pp. 290-306. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Oudin L. Michel C. Anctil F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Jornal of Hydrology*, 2005b, vol. 303, no. 1-4, pp. 275-289. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.025

Sankarasubramanian A., Vogel R.M., Limbrunner J.F. Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 2001, vol. 37, iss. 6, pp. 1771-1781. DOI: 10.1029/2000WR900330

Trzaska S. Schnarr E. *A review of downscaling methods for climate change projections (Technical report, United States Agency for International Development).* Burlington, Vermont, Tetra Tech ARD, 2014. 56 p.

International Development). Burlington, Vermont: Tetra Tech ARD. 2014. 56 p.

van Vuuren D.P. et al. The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 5-31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z

Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): project framework // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. Iss. 9. P. 3228-3232. DOI: 10.1073/pnas.1312330110.

Watanabe S. et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5 experiments // Geoscientific Model Development. 2011. Vol. 4. P. 845-872. DOI: 10.5194/gmdd-4-1063-2011

Wu Y., Zhang G., Shen H., Jun Xu Y. Nonlinear Response of Streamflow to Climate Change in High-Latitude Regions: A Case Study in Headwaters of Nenjiang River Basin in China's Far Northeast // Water. 2018. Vol. 10. No. 3. 294. DOI: 10.3390/w10030294

Zhang A., Liu W., Yin Zh., Fu G., Zheng Ch. How will climate change affect the water availability in the Heihe River basin, northwest China? // Journal of Hydrometeorology. 2016. Vol. 17. No. 5. P. 1517-1542. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0058.1

van Vuuren D.P. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011, vol. 109, pp. 5-31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z

Vinogradov Yu.B. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov formirovaniya stoka [Mathematical Modeling of River Runoff Formation Processes]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1988. 311 p. (In Russian)

Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, vol. 111, iss. 9, pp. 3228-3232. DOI: 10.1073/pnas.1312330110.

Watanabe S. et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5 experiments. *Geoscientific Model Development*, 2011, vol. 4, pp. 845-872. DOI: 10.5194/gmdd-4-1063-2011

Wu Y., Zhang G., Shen H., Jun Xu Y. Nonlinear Response of Streamflow to Climate Change in High-Latitude Regions: A Case Study in Headwaters of Nenjiang River Basin in China's Far Northeast. *Water*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 294-311. DOI: 10.3390/w10030294

Zhang A., Liu W., Yin Zh., Fu G., Zheng Ch. How will climate change affect the water availability in the Heihe River basin, northwest China? *Journal of Hydrometeorology*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 1517-1542. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0058.1

УДК: 556.5 ББК: 26.222

ПРИРОДНЫЕ РИСКИ И СТРАТЕГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

С.А. Журавин, М.Л. Марков

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

2014mml@gmail.com

Аннотация. Объектом настоящего исследования являются разномасштабные эффекты влияния изменения климата на гидрологический режим. Существующие подходы к оценке влияния климата на водные ресурсы и гидрологический режим основаны на глобальных данных или данных гидрометеорологического мониторинга регионального уровня. В соответствии с таким сложившимся подходом разрабатываются и адаптационные стратегии как на секторальном (в секторах экономики), так и на региональном уровне. Вместе с тем, реакция водного режима территорий на происходящее изменение климата, и, в первую очередь, температуры воздуха, неоднозначна для водных объектов различных масштабов. Например, на малых реках северо-запада Российской Федерации и в бассейне верхней Волги начиная с 1995-2000 г. наблюдается снижение минимального стока, в том числе зимой. Пересыхают родники, снижаются уровни грунтовых вод, деградирует первичная гидрографическая

NATURAL RISKS AND STRATEGY OF THE WATER AVAILABILITY RESEARCH OF TERRITORIES

Sergey A. Zhuravin, Mikhail L. Markov

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

2014mml@gmail.com

Abstract. According to the “Water strategy” accepted by the Government of Russian Federation in 2009, risks of the negative influence of natural water on the environment mostly are related with the peak flood runoff. The water deficit is not in the list of risks.

The water deficit has begun to increase during the past decades even in humid zones mainly due to the climate change. Therefore, there is a necessity to assess reasons and trends of water regimes and water resources changes for different territories.

The twofold of the runoff distribution in the different chains of the river network displayed for the modern decades. The low flows in the lower river chains (so-called “the large rivers”) increased substantially since 1987-1990. The same situation was in “the small rivers” until 2000’s, but low flows there became decrease later (however, it is still more than it was during 1950-1970’s). The favorable conditions of the water leakage keeping for the long period had led to the

сеть. Одновременно с этим наблюдаются значительный сток в межень на крупных реках, идет активизация процессов подтоплений территорий, экзогенных процессов. Такое несинхронное изменение водности в разных звеньях гидрографической сети речных бассейнов не может быть объяснено на основе общих соображений влияния климата на сток. Соответственно, не могут быть разработаны и оптимальные адаптивные мероприятия к происходящим изменениям в водном режиме территорий. Нестационарность и нелинейность процессов формирования стока в переходный климатический период вносят большую неопределенность в гидрологическое обоснование проектирования и эксплуатации объектов водохозяйственного комплекса, сельского хозяйства, гидроэнергетики и так далее Поэтому нужен более дифференцированный подход к оценке изменений в водном режиме территорий, связанных с нелинейной реакцией водной системы речных бассейнов на климатические изменения при переходе от одного квазистационарного состояния к другому.

Ключевые слова: климатические изменения; водный режим; обводненность территории; формирование речного стока; адаптация к изменению климата; водная стратегия

disturbance of the water balance components, when water leakage in rivers became exceed their feeding, and water has “outflow” from the basins of small rivers.

Nonsynchronous changes of the water regimes of river net chains of different order can’t be explained by “global approaches” to the climate changes. Therefore, there is a different suggested way to solve this problem, related to nonlinear reaction of the river basins water system to the climate long-term variations, when one quasi-stationary conditions (definite relative stable period of climate conditions) change to another.

It is useful to add to “The water strategy” more detailed hydrological basis. It should include all aspects of the standard and special hydrological network development, problems of the scientific study hydrological processes, spatial-temporary nonuniformity of the different order river basins water turnover reaction on the climate change.

Keywords: climate changes; water regime; moistening of the territory; river runoff formation; adaptation to climate change; water strategy

Введение

Природный риск, как вероятная мера природной опасности, установленная для объектов хозяйствования в виде возможных потерь за определенное время, служит оценкой

Zhuravin S.A., Markov M.L. Natural risks and strategy of the water availability research of territories. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 71-89 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.007

потенциальной возможности такого протекания процессов, которые оказывают негативное влияние на жизнедеятельность человека, общества и государства в целом.

В ряду природных рисков особое место занимают риски, связанные с одной из основных «стихий» – водой. Не случайно в употребление вошел термин «водная проблема», обозначающий сложные вопросы касательно удовлетворения непрерывно растущих потребностей в воде, а также различные социальные, экономические и экологические аспекты жизнедеятельности, связанные с режимом водных объектов и прилегающих к ним территорий. «Водная проблема» затрагивает развитие практически всех социально-экономических сфер и проявляется в качестве одной из самых важных в функционировании водохозяйственного комплекса страны. В принятой правительством Российской Федерации в 2009 г. «Водной стратегии» дефицит водных ресурсов обосновывается неравномерностью их распределения по территории, ограниченностью регулирующих возможностей водохранилищ, технологическими потерями и недостаточной комплексностью использования водных ресурсов в маловодные периоды [1]. Риски негативного воздействия природных вод на экономику и условия проживания населения в периоды повышенной водности связываются преимущественно с затоплением и подтоплением территорий, абразивным разрушением берегов водохранилищ.

Основное внимание уделяется последствиям негативного воздействия[1], тогда как, в результате изменений климата и в связи с ростом интенсивности хозяйственной деятельности, остро проявилась проблема оценки причин и направленности изменений водных ресурсов и водного режима различных территорий. В ряде регионов изменения гидрологического режима и связанные с ними проблемы водохозяйственного обеспечения в последние десятилетия достигли критического состояния даже при условии сохранения достаточно высокого уровня увлажнения территорий [Сурина, 2010]. Поэтому весьма важно установить причинно-следственные связи произошедших изменений, соотношение природной и антропогенной их составляющих, получить необходимую информацию для разработки и внедрения мероприятий по адаптации социально-экономического блока к текущему состоянию водных ресурсов.

[1] Водная стратегия РФ на период до 2020 года // Распоряжение Правительства от 27 августа 2009 № 1235-р.

Объект и методика исследований

Главным источником используемой пресной воды является ежегодно возобновляемый речной сток и активная часть подземных вод. Водообеспеченность территорий определяется ресурсами местного стока, формирующегося за счет осадков, а также ресурсами стока, привносимого реками со смежных территорий. Ресурсы местного стока формируют главным образом водотоки верхних звеньев гидрографической сети. В статье основное внимание уделено анализу направленности изменений местных водных ресурсов на фоне происходящих региональных изменений водного режима.

Методика исследований состоит в анализе опубликованных материалов, официальных обзоров и выявлении причин различия в многолетней динамике местных и региональных водных ресурсов.

До недавнего времени, пока объем водопотребления был относительно невелик, а изменения климатических характеристик не проявлялись столь очевидно, особых затруднений в использовании водных ресурсов в стране не возникало. Проблемы дефицита водных ресурсов в засушливых регионах успешно решались на протяжении десятилетий с помощью комплекса водохозяйственных мероприятий, таких, как строительство водохранилищ, каналов, перераспределения стока воды и так далее.

Однако в последнее время недостаток воды стал ощущаться уже не только в аридных и полуаридных районах, причем в условиях достаточного количества осадков. В 2014-2015 гг. сложилась критическая ситуация с водоснабжением в Ломоносовском и Гатчинском районах Ленинградской области. Водозаборы для пос. Кипень, пос. Гостилицы и ряда других населенных пунктов осуществляются из закрытых каптажей и скважин. Уровень подземных вод в этих районах опустился до рекордно низких отметок, часть каптажей пересохла. В связи с этим воду с ноября 2015 г. подают ограниченно, по расписанию. Даже в засушливые 1972-1973 гг. уровни грунтовых вод не опускались так низко.

В верхнем и среднем течении р. Волги в последние годы также обострились проблемы, вызванные аномально низкой водностью малых водотоков. Например, на озерах-охладителях Калининской АЭС, расположенных в приводораздельной зоне р. Волги в 2015 г. при осадках, близких к средним многолетним, наблюдались чрезвычайно низкие, фактически близкие к критическим для работы станции уровни воды.

В современных условиях изменяющегося климата наблюдается различие в изменениях формирования стока в разных звеньях гидрографической сети. Наиболее ярко

разнонаправленность изменений водности и водного режима верхних и нижних звеньев речной сети проявляется в летнюю и зимнюю межень. Согласно данным наблюдений, в нижних звеньях речной сети (как правило, это так называемые «большие реки»), начиная с 1987-1990 гг. и по настоящее время, низкий сток зимы и лета вырос по сравнению с предыдущим периодом. В верхних звеньях речной сети меженный сток частично увеличивался ориентировочно до 2000 г. В последующий период сток меженных периодов на реках верхних звеньев гидрографической сети (это, как правило, «малые реки»), водосборы которых простираются на приводораздельных пространствах больших водотоков, значительно снизился, хотя он по-прежнему выше, чем в 1950-1970-е годы. Это явление связано с тем, что, в первоначальный период, питание активных верхних водоносных горизонтов грунтовых вод превышало разгрузку из них. Сохранение благоприятных условий разгрузки воды в течение длительного времени привело к нарушению баланса: разгрузка стала превышать питание, и вода, выражаясь простым языком, «вытекла». В лесостепной зоне это явление отмечалось и ранее [Zhuravin, Markov, 2010]. Снижение обводненности приводораздельных территорий приводит к снижению уровней грунтовых вод, деградации малых рек, озер, исчезновению родников. Происходит заметное (до 50%) уменьшение густоты русловой сети [Иванова, Ларионов, 1996]. По данным наблюдений [2] на Нижнедевицкой воднобалансовой станции длина русла постоянно действующего руч. Ясенок (A=21,5 км^2) с 1982 по 1986 г. уменьшилась на 0,8 км. Последствием этих процессов является нарушение водохозяйственного обеспечения территорий. Ниже приведены примеры последствий, вызванных этим развивающимся явлением.

По данным режимных наблюдений АО «Геоцентр-Москва»[3] на приводораздельных территориях бассейна р. Волги в пределах Центрального Федерального округа (ЦФО) в 2010 г. наибольшее снижение уровней грунтовых вод составило от 1 до 8 метров. Это выразилось в осушении колодцев и скважин на четвертичном водоносном горизонте, что повлекло за собой сбои водоснабжения отдельных населенных пунктов практически по всей территории ЦФО. Снижение уровня воды в р. Оке в районе г. Калуги привело к осушению водоприемной части водозабора поверхностных вод. На западе Тверской области уровень в р. Межа снизился ниже среднемноголетних значений на 0,9 м. На полигоне «Малая Истра» расход воды в р. Малая Истра снизился до минимальных значений, а в верховьях малых рек сток воды отсутствовал.

---

[2] Материалы наблюдений Нижнедевицкой воднобалансовой станции. Курск. изд. УГМС ЦЧО. 190 с

[3] Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации. Выпуски 26-37. М.: ООО «Геоинформмарк», 2003-2014. URL: http://www.geomonitoring.ru/gmsn_sostoyanie_nedr.html

По данным Курского комитета природных ресурсов максимальное снижение уровня воды в р. Сейм в районе г. Курска составило 0,83 м, что повлекло за собой заметное понижение уровня воды в колодцах, так как существует прямая гидравлическая связь грунтовых вод с поверхностными водами. Как показали наблюдения, при снижении уровней подземных вод в маловодные годы отмечается изменение их химического состава, что проявляется в увеличении концентраций различных химических элементов. Снижение уровней грунтовых вод в 2001 г. в Смоленской области до 2,0 м привело к увеличению в 2002 г. содержания в подземных водах выше фоновых концентраций таких компонентов, как сульфаты, бериллий, стронций, селен и литий [4]. Снижение средних многолетних уровней грунтовых вод приводораздельных зон – это одна из возможных причин высыхания еловых лесов. По данным ФГУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства» в конце прошлого столетия массовые усыхания лесов приняли перманентный характер, а в некоторых областях Северо-Запада России в настоящий момент они приобрели масштаб экологической катастрофы [Арефьева, Мухин, Мирмович, 2007; Разумов, Разумова, Молчанов, 2015; Рожков, Козак, 1988; Сурина, 2010]. В европейской части России наибольшую тревогу вызывает усыхание ельников. Привлекшим к себе наибольшее внимание и, вероятно, наиболее обширным по площади в России является массовое усыхание лесов в Архангельской области, наблюдаемое с 1997 г. Усыхание имеет интенсивную динамику развития: с начала 2004 г. к концу 2005 г. площадь усыхания увеличилась примерно на 50% и оценивается сегодня более чем в 2 млн. га. При этом процесс поражения уже перекинулся и на Удорский район Республики Коми. По некоторым оценочным данным общая площадь усыхающих лесов может достигнуть 5 млн. га. Рассеянные очаги усыхания ели в массовом количестве встречаются в Ленинградской и Новгородской областях, отмечены они также в Карелии и Псковской области[4].

Водный режим меженных периодов нижних звеньев гидрографической сети определяется несколько иными факторами.

Как отмечалось выше, в последние два десятилетия двадцатого века на «малых реках» верхних звеньев гидрографической сети наблюдался высокий сток. Значительные расходы воды на «малых реках», особенно в зимний период, обусловливали увеличение уровней в средних и нижних звеньях гидрографической сети. Как показали исследования, увеличение зимнего стока в 2 раза на равнинных реках с площадью водосбора 10 тыс. км^2 приводит к

[4] Гидрометеорологический бюллетень № 5 от 28 января 2016 г. ФГБУ Гидрометцентр России. Электрон. ресурс. URL: Meteoinfo.ru.

увеличению минимального уровня воды в среднем на 0,7 м, а при площади водосбора 100 тыс. км^2 – более 1 м [Zhuravin, Markov, 2010]. Увеличение минимального уровня приводит к повышению базиса дренирования и уменьшению дренирующей способности русла водотока в нижних звеньях гидрографической сети. Вследствие этого ежегодно в теплые зимы снижается разгрузка подземных вод в межень в нижних звеньях рек и десятилетиями происходит рост средних годовых уровней грунтовых вод в прибрежных зонах, что вызывает подтопление прибрежных территорий, а также заболачивание их долин.

О масштабах увеличения стока больших рек можно судить, например, по стоку в период аномально теплой зимы 2015-2016 гг. По данным Росгидромета, сток в январе на р. Волга и р. Кама превышал норму для этого времени года в 1,3-1,7 раза в верхнем течении этих рек, и в 1,9-2,6 раза – в нижнем. На р. Уфе сток был выше среднемноголетнего в 2,3 раза. Приток в водохранилищах Новосибирское, Саяно-Шушенское, Зейское и Колымское был в 1,2-2,2 раза больше нормы. Соответственно, произошло и аномальное снижение дренирующей способности среднего и нижнего звеньев гидрографической сети, что способствовало росту уровней грунтовых вод и подтоплению территорий на этих участках[5].

В обзоре, выполненном сотрудниками ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России», подтопление рассматривается как один из основных источников чрезвычайных ситуаций в России [Разумов, Разумова, Молчанов, 2015]. В частности, в публикации сказано, что подтопление приводит к увлажнению и разжижению грунтов, к снижению их несущей способности, затоплению подвальных помещений и подземных коммуникаций. Подтопление нередко вызывает активизацию имеющихся оползней, карстовых процессов, просадку лессовых и набухание глинистых грунтов, активизацию процессов морозного пучения и даже изменения микросейсмической характеристики территории. Ущерб от подтопления составляет до 350-400 млрд. рублей в год.

Просадки лессовых массивов вызывают деформации, а иногда и полное разрушение зданий и сооружений, подземных коммуникаций, трубопроводов, транспортных систем. Просадочность лессовых грунтов в результате подтопления и избыточного увлажнения наблюдается в более чем 560 городах России. Например, в г. Волгодонске по состоянию на 2003 г. из 907 жилых зданий 732 не имели гарантированной эксплуатационной надежности из-за деформации фундаментов в результате просадок обводненных лессовых грунтов. В некоторых городах Северного Кавказа величина просадки достигает 1,0-1,5 м.

[5] Там же.

Угрожающая динамика подтопления отражается в статистических данных о том, что в 1986 г. подтоплением было охвачено 733 города России (что составляло 70%), а в 2006 г. – уже 93% всех городов страны [Арефьева, Мухин, Мирмович, 2007].

Примеров разнонаправленных изменений в водном режиме рек и уровней подземных вод можно привести еще больше, причем касаются они как полуаридных районов с традиционными проблемами в режиме увлажнения, так и районов, которые до сих пор считались более благополучными. Это явление проявляется и в восточных районах страны. Повышение уровня грунтовых вод и активизация образования наледей в зимнее время в начале нынешнего века произошли в Республиках Тыва, Хакасия, в Красноярском крае, Иркутской области, в Забайкалье. Подтопление территорий и формирование наледей оказали вредное воздействие на фундаменты домов, множество дорог и других объектов инфраструктуры [Жигунов, Семакова, Шабунин, 2007].

Основным фактором, определяющим текущую ситуацию в изменении водных ресурсов, являются долгосрочные изменения климата. Существующие подходы к оценке их влияния на водные ресурсы и гидрологический режим основаны на глобальных данных или данных гидрометеорологического мониторинга регионального уровня. В результате такого масштабного подхода, в частности, в материалах «Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации»[6] получены следующие выводы:

«На территории России (…) доминирующей тенденцией изменения годового стока рек является его увеличение. В 1981-2012 гг. по отношению к среднему уровню за период 1936-1980 гг. оно составило около 5%. В ближайшие десятилетия нет оснований ожидать каких-либо значительных изменений годового стока основных рек России в результате изменения климата. Для большей части территории страны наиболее вероятно незначительное (в пределах 5%) увеличение годового стока, что находится в пределах его естественной изменчивости. Как показывают модельные расчеты, проведенные в рамках современных представлений о будущем климате в 21 веке, водный режим рек России в ближайшие два десятилетия по своим основным параметрам будет близким к наблюдавшимся в последние 30-35 лет. Ожидаемое повышение температуры воздуха зимой позволяет полагать, что наблюдающийся увеличенный зимний сток рек сохранится и в ближайшие 2-3 десятилетия. При этом относительная доля весеннего стока в годовом стоке будет уменьшаться».

[6] Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской федерации. М.: ФГБУ НИЦ «Планета», 2014. 58 с.

В соответствии с таким сложившимся подходом разрабатываются и адаптационные стратегии как на секторальном (в секторах экономики), так и на региональном уровне (с учетом географических и природно-климатических особенностей регионов).

Выше показано на конкретных примерах, что реакция водного режима территорий на происходящее изменение климата неоднозначна для водных объектов различных масштабов. Несинхронное изменение водности в разных звеньях гидрографической сети речных бассейнов не может быть объяснено на основе общих соображений влияния климата на сток. Соответственно, не могут быть разработаны и оптимальные адаптивные мероприятия к происходящим изменениям в водном режиме территорий. Поэтому нужен более дифференцированный подход к оценке изменений в водном режиме территорий, связанный с нелинейной реакцией водной системы речных бассейнов на климатические изменения при переходе от одного квазистационарного состояния к другому.

Квазистационарный режим водных объектов соответствует определенному условно стабильному периоду состояния климата и характеризуется определенными условиями формирования стока воды и других элементов водного баланса, а также определяющих их факторов. Пример выделения таких периодов по данным наблюдений за годовым стоком воды на водотоках Подмосковной (ПВБС) и Нижнедевицкой (НДВБС) воднобалансовых станций приведен на рисунках 1, 2.

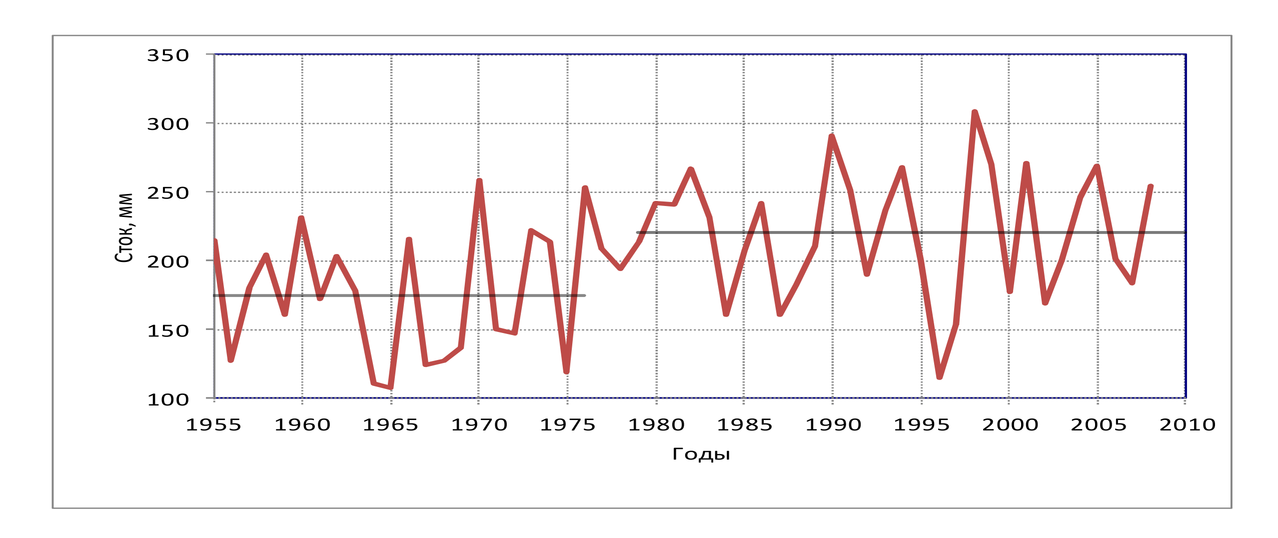


Рисунок 1. Изменения годового стока р. Медвенки - выше впадения р. Закзы (ПВБС)

Figure 1. Changes of annual runoff of Medvenka river – above confluence with river Zakzi (water-balance station near Moscow)

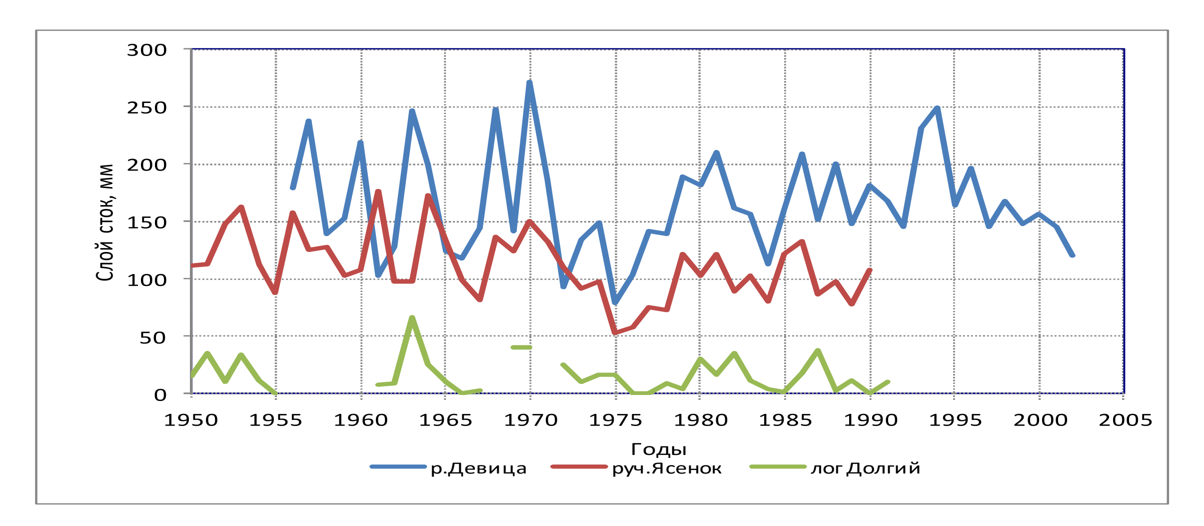


Рисунок 2. Изменения годового стока р. Девица - п. Товарня, руч. Ясенок и лога Долгого (НДВБС).

Figure 2. Changes in the annual runoff of the Devitsa River at Tovarnaya, Yasenok brook and Dolgiy blind creek (Nizhnedevitskaya water-balance station)

Изменения годового стока водотоков воднобалансовых станций за период наблюдений показывают наличие двух квазистационарных и переходного периодов, соответствующих изменению климатической ситуации. В зоне смешанных лесов (ПВБС) наблюдается заметный рост годового стока воды, в то время как в лесостепной зоне (НДВБС) произошло снижение стока, особенно на водотоках первичного звена гидрографической сети с неполным дренированием грунтовых вод. Каждому из таких периодов соответствует определенная преобладающая система влагооборота, которая определяет гидрологический режим, пространственное и временное распределение водных ресурсов, когда при тех же (и даже больших) осадках могут возникать более продолжительные периоды их дефицита. Продолжительность процесса стабилизации режима водных объектов для периодов с преобладанием поверхностного стока (1940-1970 гг.) и доминированием его подземной составляющей (после 1980 г.) заметно отличается по времени ввиду большой инерционности процессов миграции влаги в зоне активного водообмена. И это должно найти отражение при формировании региональных программ социально-экономического развития, при разработке и осуществлении мероприятий, обеспечивающих рациональное использование, восстановление и охрану водных объектов и их водных ресурсов, предотвращение негативного воздействия вод и на воды.

Обсуждение причин различия в многолетней динамике местных и региональных водных ресурсов

Анализ причин несинхронности реакции водных объектов на происходящее изменение климата основан преимущественно на исследованиях, выполненных в ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (далее – ГГИ).

Произошедшее в последние три десятилетия потепление зим привело к снижению роли криогенных явлений и процессов, которые в предшествующий квазистационарный климатический период способствовали уменьшению минимального стока рек, но благоприятно влияли на повышенный сток весеннего половодья.

С одной стороны, уменьшилась глубина и продолжительность периода промерзания почво-грунтов. Это привело к увеличению инфильтрации атмосферных осадков, что, на первый взгляд, должно было способствовать росту питания подземных вод. С другой стороны, заметно возрос сток внутрипочвенной верховодки, который увеличивает зимний сток рек, но при этом препятствует поступлению воды в верхние водоносные горизонты (рисунок 3).

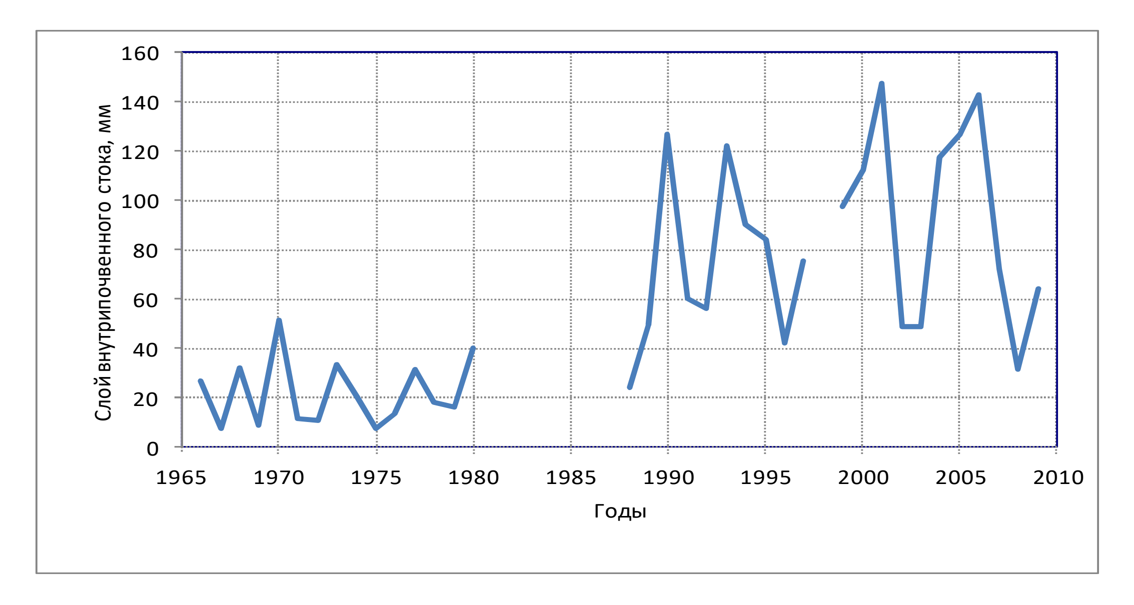


Рисунок 3. Изменения годового слоя внутрипочвенной верховодки по данным наблюдений на полевой воднобалансовой площадке ПВБС.

Figure 3. Changes in the annual depth of the top water according to observations at the field water balance plot at water-balance station near Moscow

В условиях потепления климата и установления оттепельного зимнего режима дренирование малыми реками верхней зоны активного водообмена зимой возросло по изложенным ниже причинам:

- Снизилась величина аккумуляции подземных вод во льду в зоне аэрации при миграции незамерзшей влаги к фронту промерзания. Исследование условий формирования запасов влаги в почве в зимний период в бассейне р. Вятки и на объектах Валдайского филиала ГГИ показали, что они могут увеличиваться к концу холодной зимы на величину до 40 мм. Соответственно, при потеплении эта влага не аккумулируется и может участвовать в стоке рек.

- Уменьшились потери подземного питания рек на формирование ледовых образований: речного льда, наледей, сезонных подземных льдов. Особенно актуально это на территории распространения многолетней мерзлоты. Здесь зимой на реках образуется мощный ледяной покров толщиной 1-2 м, наледи разных типов и сезонные подземные льды, за счет чего сток в реках может существенно сокращаться или полностью прекращаться.

- При уменьшении толщины льда в реках возрастает пропускная способность русел. Уменьшение толщины льда, например, в бассейне р. Северной Двины всего на 15 см приводит к увеличению стока в конце зимы в малых ручьях почти в 2 раза по сравнению с холодными зимами. Для бассейна р. Алдан отклонение средней зимней температуры воздуха от средней многолетней температуры на 2-3° приводит к отклонению среднего зимнего стока рек на 20-30% от среднего многолетнего значения. На р. Норильской колебания толщины льда контролируют до 25-30% меженного стока при равных гидрометеорологических условиях в предзимний период.

- При уменьшении промерзания почво-грунтов возрастает их воздухопроницаемость. При более свободном проникновении воздуха в зону аэрации над грунтовыми водами зимой не создается более низкое давление, чем в атмосфере, и подземные воды свободно разгружаются в реки. В ГГИ проводились экспериментальные работы по выявлению влияния колебания давления воздуха в зоне аэрации на режим разгрузки подземных вод в водные объекты. Уже первые результаты показали, что разница давления в атмосфере и в ненасыщенной зоне почво-грунтов при прохождении атмосферных фронтов может составлять до 50-100 мм в эквиваленте водяного столба, а зимой – до 200 мм и более при формировании сезонно-мерзлого слоя, слабо пропускающего воздух, необходимого для заполнения пустот при снижении уровня грунтовых вод. При потеплении зим и прекращении промерзания почво-грунтов это физическое явление, существенно снижающее уровни подземных вод при отсутствии инфильтрации, исчезает.

В результате перечисленных процессов при увеличении зимней температуры воздуха, с одной стороны, может происходить увеличение питания подземных вод за счет роста

инфильтрации атмосферных осадков, а с другой – улучшение условий разгрузки водоносных горизонтов в сеть малых водотоков, которые составляют порядка 80% всей гидрографической сети. Поэтому ключевым фактором современного состояния зоны активного водообмена и уровней грунтовых вод в ней в верхних звеньях гидрографической сети является соотношение питания этой зоны (то есть части осадков, проникающих в зону аэрации и в насыщенную зону) и разгрузки из нее.

В разных регионах страны эти процессы проявляются по-разному. Например, в северных и сибирских регионах значительное промерзание есть всегда и это не сказывается на увеличении питания подземных вод. Но зимний сток на реках этих регионов практически везде имеет тенденцию роста, так как снизились «потери» на ледообразование и улучшилась пропускная способность русел рек при уменьшении толщины льда.

Описанные процессы улучшения дренирующей способности гидрографической сетью речных бассейнов при повышении температуры воздуха привели постепенно к их «подсушке» в ряде районов [Grigoriev, Frolova, 2018] и снижению, прежде всего, летнего минимального стока. Снижение минимального стока в условиях продолжающегося потепления зим, соответственно, обусловлено снижением уровней грунтовых вод в приводораздельной зоне речных бассейнов (рисунки 4, 5).

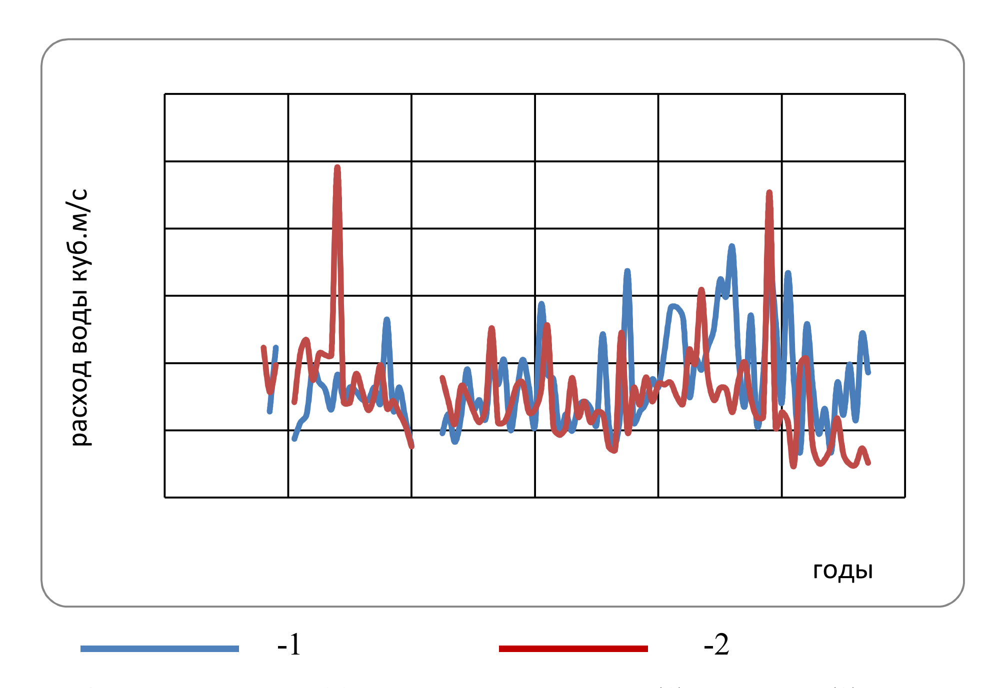


Рисунок 4. Минимальный 30-ти суточный зимний (1) и летний (2) сток р. Луги - ст. Толмачево (F=6350/302 км^2).

Figure 4. Minimum 30-day winter (1) and summer (2) runorr of the Luga River at Tolmachevo (F=6350/302 km^2)

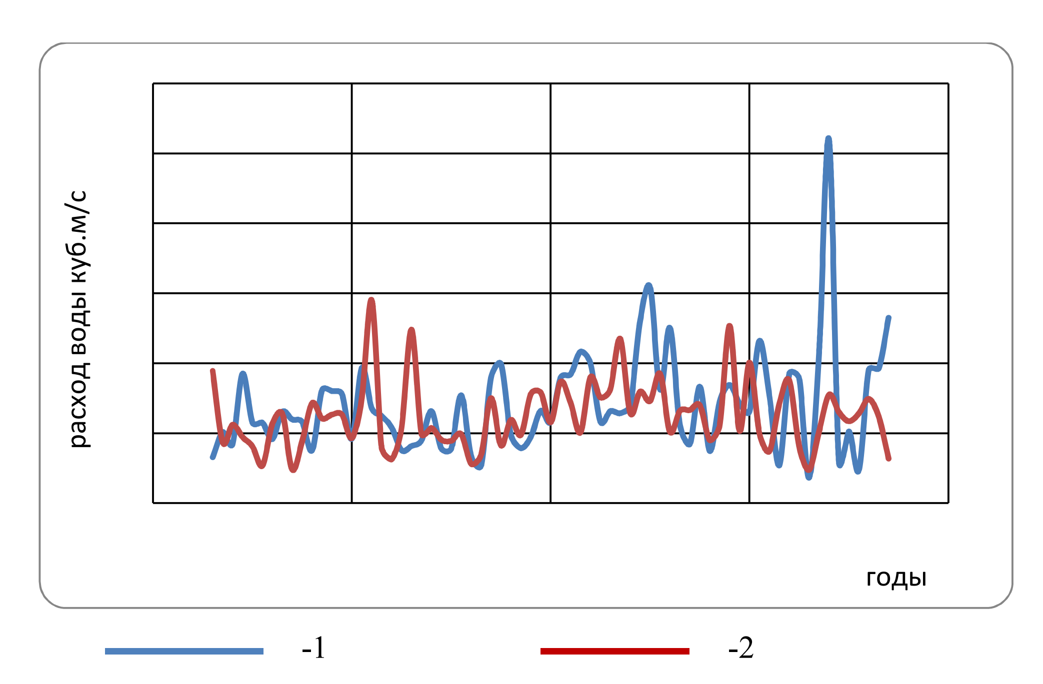


Рисунок 5. Минимальный 30-ти суточный зимний (1) и летний (2) сток р. Систы - д. Ср. Райково (F = 573 км^2).

Figure 5. Minimum 30-day winter (1) and summer (2) runoff of the Siste River at Raikovo (F=573 km^2)

При сохранении современных тенденций роста температуры воздуха, вызванного глобальным потеплением климата, особенно проявляющегося и прогнозируемого в зимний сезон, следует ожидать дальнейшего ослабления криогенного регулирования водного режима территорий. Это приведет к дальнейшему постепенному снижению запасов подземных вод на верхних участках речных бассейнов, деградации малых рек. Между тем «малые реки», на которых, собственно, и формируется основная часть стока, практически не учитываются ни в «Водной стратегии», ни при разработке водохозяйственных мероприятий. Наблюдения за их режимом на сети Росгидромета фактически прекращены, а ранее действовавшие посты закрыты.

Следует отметить также, что современный период характеризуется и возросшей неравномерностью внутригодового и межгодового режима увлажнения, причем не только в полуаридных районах, но также и в южной части зоны достаточного увлажнения, что увеличивает риски для сельского хозяйства и водоснабжения. Так, засушливые периоды с запасами влаги, близкими к влажности завядания, в настоящее время наблюдаются с частотой раз в 5-7 лет, и даже раз в 3-5 лет, при том, что в среднем увлажнение в верхнем метровом слое почво-грунтов возросло (рисунок 6). Аналогичная ситуация наблюдалась в засушливые 2007 и 2010 годы.

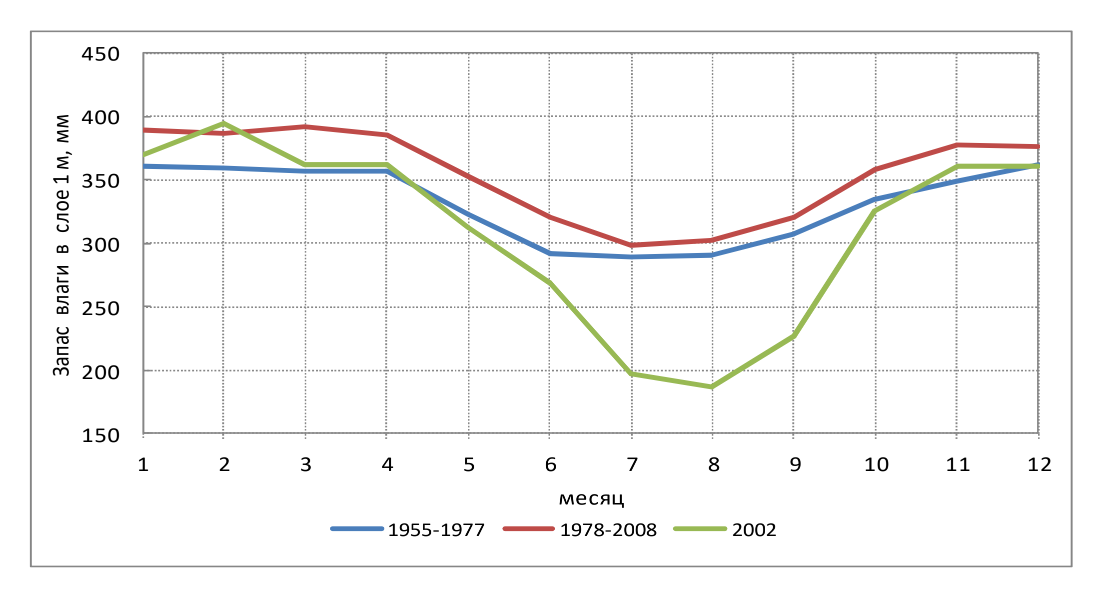


Рисунок 6. Средние за периоды 1955-1977 гг. и 1978-2008 гг. влагозапасы почво-грунтов в слое в 1 м на ПВБС и их величины в 2002 г.

Figure 6. Mean average soil moisture content in 1 m layer for the period of 1955-1977 and 1978-2008 at water-balance station near Moscow and their values for 2002

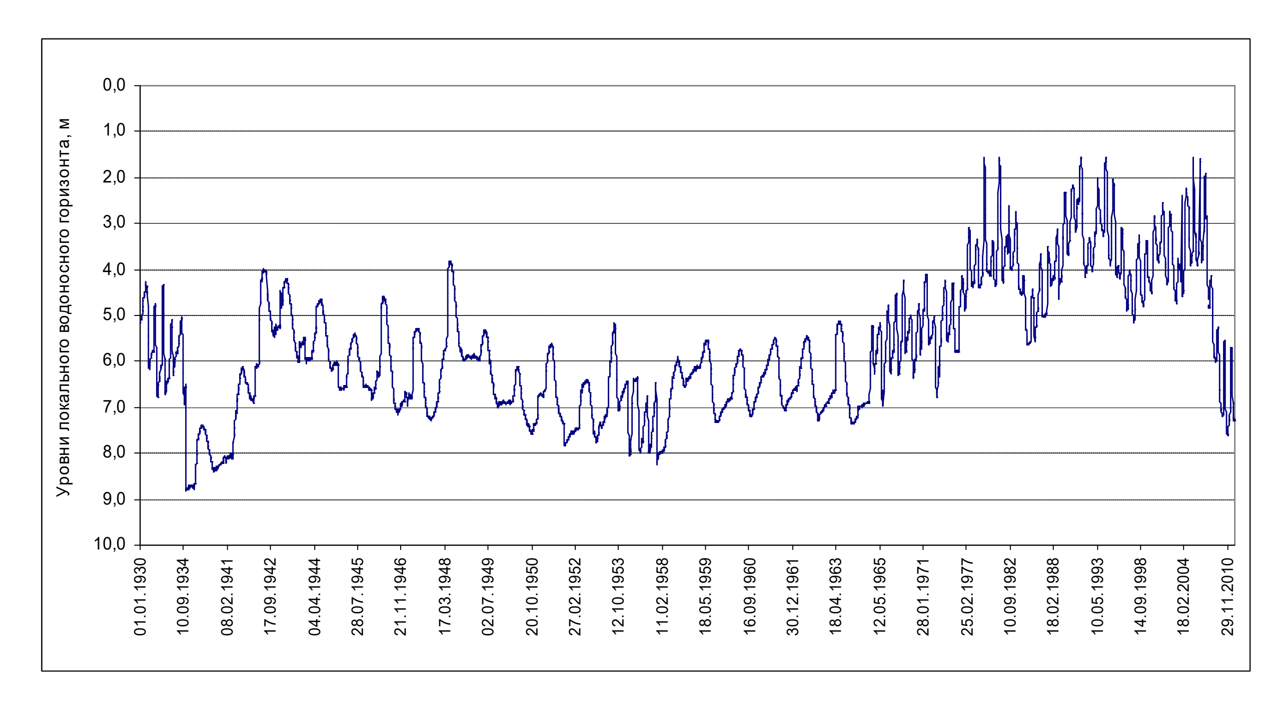


Рисунок 7. Изменения уровней верхнего водоносного горизонта на ВБС Каменная Степь (степная зона).

Figure 7. Changes in the ground water table of the upper aquifer at the Kamennaya Steppe water-balance station (steppe zone)

В полуаридных районах даже непродолжительные серии маловодных лет могут привести к резкому падению уровней грунтовых вод верхних горизонтов на несколько метров, что имеет большое значение для местного водоснабжения (рисунок 7).

Рассмотренные процессы происходящей перестройки водообмена между поверхностными и подземными водными объектами еще чрезвычайно слабо изучены. Начиная с 90-х годов прошлого века экспериментальные исследования этих процессов свернуты. Закрыты многие воднобалансовые станции Росгидромета. На оставшихся воднобалансовых станциях критически сокращен объем наблюдений. Существенно сокращен также и мониторинг подземных вод в Российской Федерации, особенно грунтовых вод зоны активного водообмена. За рубежом подобные исследования также практически не проводятся.

Заключение

Изменения климата в последние десятилетия привели к существенным изменениям в процессе влагооборота в верхних и нижних звеньях гидрографической сети, которые вызвали возрастание рисков дефицита водных ресурсов, в том числе в зоне достаточного и даже избыточного увлажнения. Современные условия взаимодействия поверхностных и подземных вод способствуют «иссушению» приводораздельных водосборов малых рек и их деградации, в то время как прирусловые части более крупных водотоков подвергаются подтоплению и заболачиванию. Кроме того, наблюдается возрастание неравномерности увлажнения территорий, как на внутригодовом, так и на межгодовом уровне.

При разработке адаптационных мероприятий водохозяйственного комплекса РФ к происходящим изменениям климата целесообразно внести дополнения в «Водную стратегию», касающиеся более углубленной проработки гидрологического блока. В него должны быть включены все аспекты развития стандартной и специализированной гидрологической сети, а также вопросы развития научного изучения гидрологических процессов, прежде всего, пространственно-временной неоднородности реакции влагооборота в речных бассейнах разного порядка на изменение климата. Особое внимание следует уделять зонам формирования стока, то есть «малым рекам», которые в настоящее время фактически исключены из системы мониторинга водных объектов, а также не рассматриваются при проектировании водохозяйственных мероприятий, хотя именно на них формируется основная часть водных ресурсов. Крупные реки являются преимущественно объектами транзита этих ресурсов.

Поэтому сложившийся десятилетиями «глобальный» подход к оценкам изменения водного режима крупных территорий не может быть методической основой для решения локальных и региональных водохозяйственных проблем. Стратегия адаптации водного хозяйства должна быть отработана на ряде бассейнов, испытывающих наиболее острые проблемы в области обеспечения водохозяйственного комплекса и развития негативных явлений, связанных с изменениями гидрологического режима территорий.

Литература

Арефьева Е.В., Мухин В.И., Мирмович Э.Г. Подтопление, как потенциальный источник чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2007. Том 4. № 4. С. 69-72.

Жигунов А.В, Семакова Т.А., Шабунин Д.А. Массовое усыхание лесов на Северо-Западе России // Материалы научной конференции «Лесобиологические исследования на Северо-Западе таежной зоны России: итоги и перспективы», посвященной 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск, 3-5 октября 2007 года). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 42-52

Иванова Н.Н., Ларионов Г.А. Динамика протяженности малых рек: факторы и количественные оценки // Причины и механизмы пересыха-

References

Aref'eva E.V., Mukhin V.I., Mirmovich E.G. Podtoplenie, kak potentsial'nyi istochnik chrezvychainykh situatsii [Submergence as a Potential Source of EC]. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti [Civil Security Technologies],* 2007, vol. 4, no. 4, pp. 69-72. (in Russian; abstract in English)

Grigoriev V.Yu., Frolova N.L. Terrestrial water storage change of European Russia and its impact on water balance. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 38-50. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-38-50

Ivanova N.N., Larionov G.A. Dinamika protyazhennosti malykh rek: faktory i kolichestvennye otsenki [The dynamics of the length of small rivers: factors and quantitative estimates] In Dedkov A.P., Butakova G.P. (eds.) *Prichiny i mekhanizmy peresykhaniya malykh rek [Causes and mechanisms of drying up of small rivers]*. Kazan', Publ. of Kazan. University, 1996, pp. 37-42 (in Russian)

Razumov V.V., Razumova N.V., Molchanov E.N. Podtoplenie zemel' v Sibirskom regione Rossii [Flooding of lands in the Siberian region of Russia]. *Georisk*

ния малых рек / Под ред. А.П. Дедкова, Г.П. Бутакова. Казань: изд-во Казан.ун-та, 1996. С. 37-42

Разумов В.В., Разумова Н.В., Молчанов Э.Н. Подтопление земель в Сибирском регионе России // Георисκ. 2015. № 4. С. 22-36.

Рожков А.А., Козак В.Т. Устойчивость лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 232 с.

Сурина Е.А. К вопросу об усыхании ельников в междуречье Северной Двины и Пинеги в условиях глобального потепления климата // Материалы Всероссийской конференции: IV Мелеховские научные чтения, посвященные 105-летию со дня рождения Мелехова И.С. «Проблемы лесоведения и лесоводства» (г. Архангельск, 10-12 ноября 2010 г.). Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. С. 188-191.

Grigoriev V.Yu., Frolova N.L. Terrestrial water storage change of European Russia and its impact on water balance. // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 38-50. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-38-50

[Georisk], 2015, no. 4, pp. 22-36, 58-59. (in Russian; summary in English)

Rozhkov A.A., Kozak V.T. *Ustoichivost' lesov* [*Sustainability of forests*]. Moscow, Publ. Agropromizdat, 1988. 232 p. (in Russian)

Surina E.A. K voprosu ob usykhanii el'nikov v mezhdurech'e Severnoi Dviny i Pinegi v uslovi-yakh global'nogo potepleniya klimata [On the issue of drying of spruce forests between the Northern Dvina and Pinega between the conditions of global warming] *Materialy Vserossiiskoi konferentsii: Chetvertye Melekhovskie nauchnye chteniya, posvyashchennye 105-letiyu so dnya rozhdeniya Melekhova I.S. «Problemy lesovedeniya i lesovodstva» (g. Arkhangel'sk, 10-12 noyabrya 2010 g.) [Materials of the All-Russian Conference: Fourth Melekhov scientific readings dedicated to the 105th anniversary of the birth of I. Melekhov "Problems of forest science and forestry" (Arkhangelsk, November 10-12, 2010)]*. Arkhangel'sk, Severnyi (Arkticheskii) federal'nyi universitet, 2010, pp. 188-191.

Zhigunov A.B, Semakova T.A., Shabunin D.A. Massovoe usykhanie lesov na Severo-Zapade Rossii [Mass drying of forests in the North-West of Russia]. *Materialy nauchnoi konferentsii «Lesobiologicheskie issledovaniya na Severo-Zapade taezhnoi zony Rossii: itogi i perspektivy», posvyashchennoi 50-letiyu Instituta lesa Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN (g. Petrozavodsk, 3-5 oktyabrya 2007 goda) [Proceedings of the Scientific Conference «Forest biology research in the northwest of the russian taiga zone: results and visions», celebrating the 50th anniversary of the Forest Research Institute*

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks. // Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins» (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009). / eds. by A. Herrmann, S. Schumann. IAHS Publ. 336. 2010. P. 219-224.

Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, October 3-5, 2007)]. Petrozavodsk, Publ. of Karelian Research Centre of RAS, 2007, pp. 42-52 (in Russian)

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks. In A. Herrmann, S. Schumann (eds.) *Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins» (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009)*. IAHS Publ. 336, 2010, pp. 219-224.

ЭВОЛЮЦИЯ ГИДРОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

THE EVOLUTION OF THE EARTH'S HYDROSPHERE

УДК 556

ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕК ЮЖНОГО ПРИИЛЬМЕНЬЯ В ГОЛОЦЕНЕ

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1], М.М. Кадацкая[1,2]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. Речное русло в процессе своей эволюции подвержено деформациям, проявляющимся в виде размыва русла и поймы, переноса и аккумуляции наносов. Знание истории развития речных русел в условиях, характерных для данной территории, позволяет дать оценку их эволюции в будущем. Целью исследования являлось выявление особенностей формировании и эволюции гидрографической сети Южного Приильменья в голоцене. Эти особенности преимущественно связаны с последним Валдайским оледенением. Во-первых, реки возникли только после отступления ледника и имеют возраст примерно от 11 до 14 тыс. лет назад. Во-вторых, их развитие

HISTORY OF FORMATION OF THE RIVERS OF SOUTH PRILIMENIUM IN HOLOTSEN

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Victor A. Obyazov[1], Mariya M. Kadatskaya[1,2]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia
[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. The riverbed in the course of its evolution is subject to deformations, manifested in the form of erosion of the channel and floodplain, sediment transport and accumulation. Knowledge of the history of the development of river channels in the conditions characteristic of a given territory allows us to assess their future evolution. The aim of the study was to identify the features of the formation and evolution of the hydrographic network of Southern Priilmenye in the Holocene. These features are mainly associated with the last Valdai glaciation. Firstly, rivers arose only after the retreat of the glacier and are about 11 to 14 thousand years old. Secondly, their development was controlled by a changing erosion

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Kadatskaya M.M. History of formation of the rivers of south Prilimenium in holotsen. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 90-113 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.001

контролировалось меняющимся базисом эрозии, зависящим от уровня приледникового озера, сформировавшегося на южной периферии ледника при его отступлении. В-третьих, эволюция водотоков происходила в условиях компенсационного деформационного поднятия территории.

В результате на территории Южного Приильменья сформировались реки, в начальной стадии своего развития свободно меандрирующие по широкой и почти плоской равнине, сложенной флювиогляциальными отложениями. Затем, по мере понижения базиса эрозии, происходило врезание русел в водоупорные ледниковые отложения Валдайского горизонта. В последнее тысячелетие вертикальный размыв резко усилился, что связано с преодолением трудноразмываемых флювиогляциальных четвертичных суглинистых пород и непосредственным воздействием потока на нижележащие девонские отложения, и в настоящее время по нашей оценке достигает 1-3 см в год. По мере врезания русел рек плановые деформации существенно замедлились. Русла развиваются, хотя и не полной мере, по типу вынужденного меандрирования.

Ключевые слова: эволюция гидрографической сети; базис эрозии; русловой процесс; озеро Ильмень; Осташковское оледенение

basis, depending on the level of the subglacial lake, which formed on the southern periphery of the glacier during its retreat. Thirdly, the evolution of watercourses occurred in conditions of compensatory deformational elevation of the territory.

As a result, rivers formed on the territory of Southern Priilmen'e, in the initial stage of their development, meandering freely along a wide and almost flat plain composed of fluvioglacial deposits. Then, as the erosion basis decreased, the channels incised into the water-resistant glacial deposits of the Valdai horizon. In the last millennium, vertical erosion sharply increased, which is associated with overcoming difficult to wash out fluvioglacial Quaternary loamy rocks and the direct impact of the flow on the underlying Devonian sediments, and at present, according to our estimates, it reaches 1-3 cm per year. As the riverbeds cut in, the planned deformations slowed significantly. The channels develop, although not to the full extent, by the type of forced meandering.

Keywords: hydrographic network evolution; erosion basis; channel process; lake Ilmen; Ostashkovsky glaciation

Введение

Речное русло в процессе своей эволюции подвержено деформациям, проявляющимся в виде размыва русла и поймы, переноса и аккумуляции наносов. Интенсивность процесса деформации определяется размывающей и транспортирующей способностью потока и постоянством общего базиса эрозии. Поток, протекающий в русле, вызывает общие для всей реки односторонние деформации, выражающиеся в снижении продольного профиля к отметке базиса эрозии.

История рек и озер Приильменской низменности неразрывно связана с историей самой низменности. Поскольку исследуемая территория подвергалась покровному оледенению, сыгравшему решающую роль в формировании и эволюции гидрографической сети в послеледниковый период, исследованию которой и посвящена данная работа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– оценка по литературным данным изменения уровня океана и высотных отметок территории Северной Европы в голоцене;

– расчет величины деформационной просадки грунтов под воздействием ледниковых масс и последующего компенсационного поднятия после снятия нагрузки;

– оценка изменений уровня Ладожского озера, отметок водоразделов, замыкавших сток из оз. Ильмень, и Волховских порогов, как базиса эрозии рек Приильменья, во время и после деградации Осташковского оледенения;

– характеристика эволюции рек Южного Приильменья.

Объект исследования

Реки Южного Приильменья начинаются в верховом болотном массиве Красный Мох – Полисто-Ловатская болотная система с абсолютными отметками 90-100 м. Это малые реки Псижа, Перехода, Снежа, Холынья, Порусья, Полисть, Редья, Шелонь. Исключение составляют р. Пола (с отм. истока 260 м) и р. Ловать (исток – оз. Ловатец с отм. 175 м), которые берут начало южнее в пределах Валдайской возвышенности и пересекают Ильменскую низменность с юга на север (рисунок 1).

Ильменская котловина представляют собой аккумулятивную озерно-ледниковую равнину Валдайского горизонта позднеледниковых слоев озерных и озерно-ледниковых отложений [Геология СССР, 1971]. Заложение современной речной сети произошло в

процессе деградации валдайского оледенения. Общее направление стока определяется северной экспозицией поверхности данной территории.

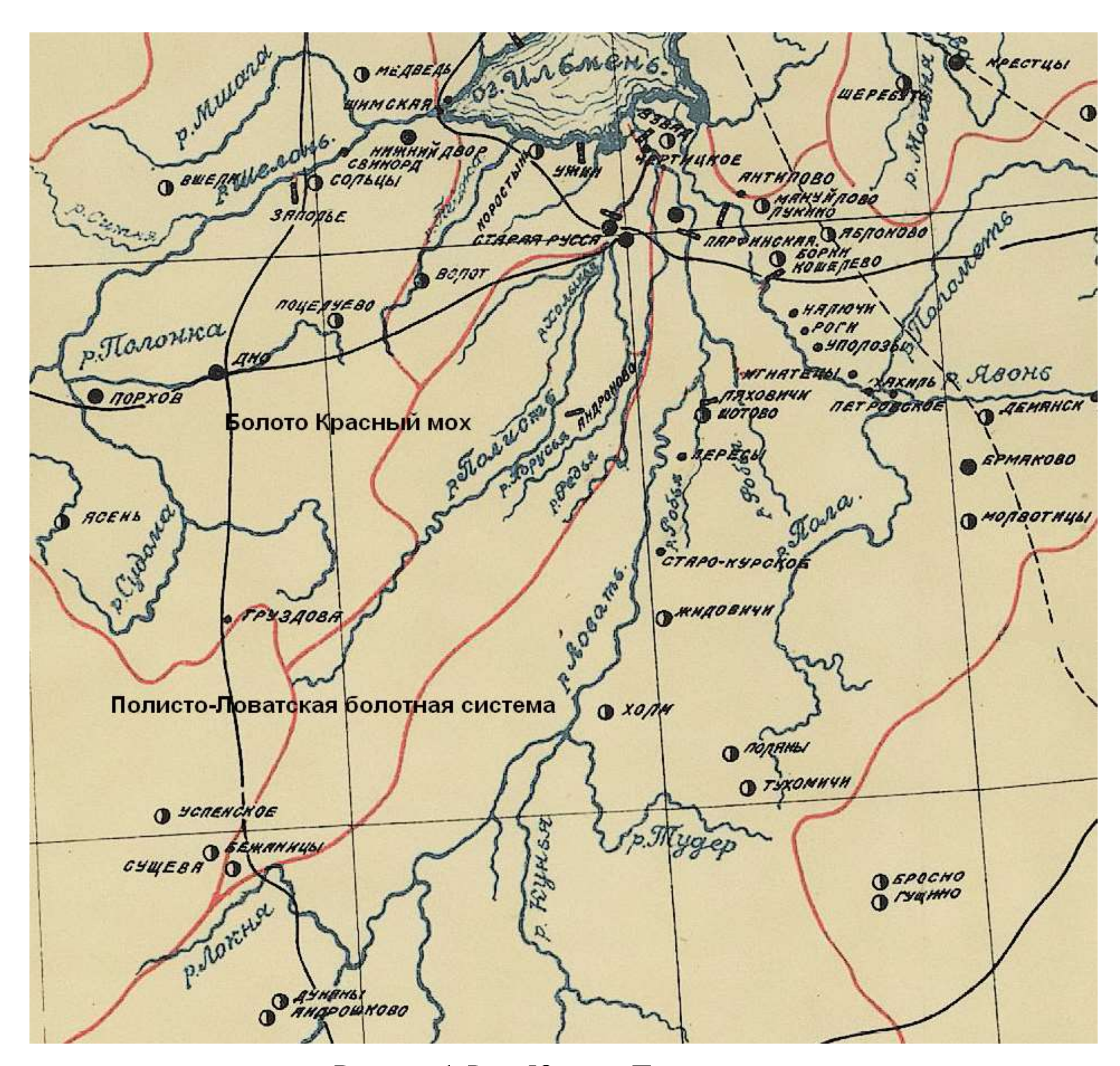


Рисунок 1. Реки Южного Приильменья

Источник: http://www.etomesto.ru/map-novgorod_ilmen-volkhov-1926/

Figure 1. Rivers of Southern Priilmenye

Озерно-ледниковая равнина с запада, юга и востока окаймляется поясом абрадированных моренных равнин, к которому приурочены обширные водораздельные болотные массивы.

Уклоны поверхности Приильменской низменности составляют в среднем 0,8‰ и имеют максимальный градиент (1,3‰) на отметках 60-75 м БС. Энергия водных потоков

невелика, все долины направлены по уклону на северо-восток и конфигурация русел рек имеет параллельный тип [Динамическая геоморфология, 1992].

Исследуемая территория подвергалась нескольким оледенениям, последним из которых было Валдайское. Оно состояло из ранневалдайского или Тверского (70-55 тыс. лет назад) и поздневалдайского или Осташковского (24-10 тыс. лет назад) оледенений [Геология СССР, 1971]. Максимальное распространение льда Осташковского оледенения имело место от 17 тыс. [Геология СССР, 1971] до 20 тыс. лет назад [Rinterknecht et al., 2018]. После этого началось таяние ледника, которое в Европе закончилось 8 тыс. лет назад, а 5 тыс. лет назад прекратилось окончательно и в Америке [Геология СССР, 1971].

Современные реки Южного Приильменья, формирование которых стало возможным только после освобождения территории от покровного оледенения, возникли с геологической точки зрения совсем недавно – около 15 тыс. лет назад [Hughes et al., 2016; Gorlach, Hang, Kalm, 2017; Rinterknecht et al., 2018].

Результаты исследования

Уровень океана в период Осташковского оледенения, был ниже современного на 100 м [Чистяков, Макарова, Макаров, 2000], а после начала таяния покровных ледников повышался со скоростью 9 м за 1 тыс. лет и стабилизировался на современных отметках около 5 тыс. лет назад [Мернер, 1986a; Мернер, 1986b]. В это же время, по данным [Шельфы Евразии…, 1991; Кузнецов, 1992], амплитуда понижения и последующего подъема уровня Мирового океана в рассматриваемый период превысила 200 м. В. Рамзай оценивает минимальную отметку уровня океана во время максимума Осташковского оледенения в 183 м [Ramsay, 1931]. В любом случае, по мнению всех исследователей, уровень Мирового океана последние тысячелетия относительно стабилен. Эвстатическое повышение уровня Мирового океана последние 5-7 тыс. лет составляют 0,8 мм/год [Никонов, Энман, Флейфель, 2008] или около 5 м за указанный период. В предположении, что поднятие уровня Мирового океана проходило по функциональной зависимости, представленной нами на рисунке 2, и сроки полной деградации ледникового покрова укладываются в 11 тыс. лет (с 17 по 6 тыс. лет назад) [Stokes, 2017], проведем качественную реконструкцию повышения уровня мирового океана.

Фенноскандия в течение всего поздне- и послеледникового времени непрерывно испытывала эндогенное поднятие [Никонов, 1977]. Высота поднятия за последние 5-7 тыс. лет оценивается на севере Ладоги в 20 м, на юге – в 2-4 м. Территория Приильменской низменности за этот период, согласно А.А. Никонову [Никонов, Энман, Флейфель, 2008],

поднятием не затронута. Кроме того, на тех частях территории, которые имеют мощный слой осадочных супесчаных, суглинистых и глинистых отложений и подвергались ледниковой нагрузке, после таяния ледника происходило компенсационное деформационное поднятие.

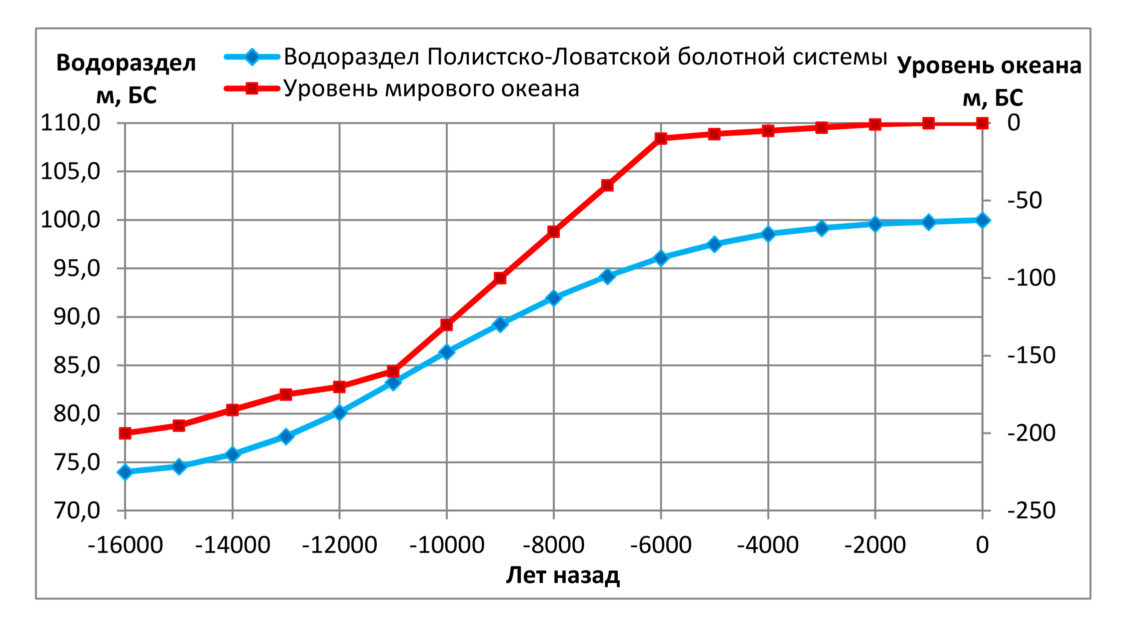


Рисунок 2. Изменение уровня мирового океана и абсолютных отметок водораздела Полистско-Ловатской болотной системы

Figure 2. Changes in sea level and absolute elevations of the watershed of the Polisto-Lovatskaya bog system

Следовательно, для всей части южного Приильменья необходимо ввести высотную поправку на поднятие, произошедшее после Осташковского оледенения. Побережье нынешнего Ладожского озера по данным А.А. Никонова [Никонов, Энман, Флейфель, 2008] претерпело изостатическое поднятие на севере до 120 м, на юге – до 45 м. Озеро Ильмень находится в области, которая не подвергалась изостатическому поднятию [Квасов, 1975]. В других источниках [Чистяков, Макарова, Макаров, 2000], величина поднятия современной чаши Ильменя не превысила 10-15 м, а нулевая изолиния прошла несколько южнее города Старая Русса.

Исходя из геологической карты четвертичных отложений Ленинградской, Псковской и Новгородской областей [Геология СССР, 1971], граница Осташковского оледенения проходила южнее линии Бежаницы – Холм – Валдай, следовательно, вся территория Приильменской низменности испытывала воздействие ледниковых масс. По данным [Гроссвальд, 2009], основанным на реконструкции Т. Хьюза, толщина слоя льда на линии Шимск – Старая Русса составляла 1300 м, а в районе истоков рассматриваемых рек – не менее

1000 м. При таких условиях, среднее давление на квадратный метр территории составляет около 1000 тонн, следовательно, высотная стабильность территории маловероятна. На основании учета общего градиента изостатического поднятия [Субетто, 2007], можно предположить, что подъем приводораздельных болотных массивов по линии Дедовичи – Поддорье – Демянск составил 10-15 м, при этом южная часть озера Ильмень по линии Шимск – Старая Русса поднялась не менее, чем на 25-30 м.

Проведем прикидочный расчет величины деформационной просадки при максимальном распространении ледникового покрова (~20 тыс. лет назад). Осадка толщи грунта рассчитывается по [Цытович, 1983]:

$$S = \frac{hm_0 p}{1 + e_0} \tag{1}$$

где h – слой девонских и четвертичных доледниковых отложений, м;

p – удельная ледниковая нагрузка (кг/м^2);

e_0 – начальный коэффициент пористости, принят равным 0,22 (б/р)[1];

m_0 – коэффициент сжимаемости слоя осадочных пород, подстилающего ледник:

$$m_0 = \beta \frac{1 + e_0}{E_{од.}} \tag{2}$$

где $E_{од.}$ – модуль общей деформации, принят равным 750000 (кгс/м^2)[2];

β – величина, зависящая от коэффициента поперечной деформации (бокового расширения):

$$\beta = 1 - \frac{2\mu_0^2}{1 - \mu_0} \tag{3}$$

где μ_0 – коэффициент поперечной деформации (бокового расширения), принят равным 0,35[3].

[1] Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. – М., ДАРВОДГЕО, 2005
[2] Там же
[3] Там же

Слой осадочных пород условно принимаем как однородный, суглинки. В расчетах пренебрегаем:

- собственным весом грунта;
- осадками и хрупким разрушением кристаллических пород;
- влажностью грунтов;
- мерзлыми свойствами грунтов.

Сжатие происходит в первую очередь за счет уменьшения пористости толщи подстилающих ледник грунтов. Расчет изменения коэффициента пористости проводится по следующей зависимости:

$$e_1 = e_0 - (1 + e_0)\frac{S_i}{h} \quad (4)$$

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Расчет просадок грунта при максимальном воздействии ледника.
Table 1. Calculation of subsidence of soil at the maximum impact of the glacier.

Параметры	верховье Полы	оз. Ловатец	водораздел	оз. Ильмень	пос. Грузино	южный берег Ладожского озера
$H_{льда}$, м	900	900	1000	1300	1600	1600
p, кг/м^2	855000	855000	950000	1235000	1520000	1520000
h, м	800	700	520	320	250	80
E, кгс/м^2	3071385	3071385	3071385	3071385	3071385	3071385
S, м	56,8	49,7	41,0	32,8	31,6	12,6
e_1	0,16	0,16	0,16	0,14	0,12	0,12

При снятии нагрузки, за счет упругой деформации происходит компенсационное поднятие. Модуль упругой деформации $E_{упр.д.}$ ветви разгрузки [Барац, 2008] (оценочно) согласно[4] $E_{упр.д.}$=5 $E_{од.}$ [Виноградов, Обязов, 2018].

Далее, предположим, что таяние ледника проходило по квазилинейному закону. Тогда уменьшение мощности ледника составляло, в среднем, 250 м/1000 лет.

[4] Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. СП 50-101-2004. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 130 с.

Предельное компенсационное деформационное поднятие рассчитано по формуле [Цытович, 1983]:

$$S_n = \frac{hm_1 p}{1+e_1} \quad (5)$$

где p – снятая удельная нагрузка при таянии ледника, (кг/м^2);

e_1 – усредненный коэффициент пористости сжатого слоя за расчетный период.

Величина поднятия за период t, определялась согласно [Цытович, 1983]:

$$S_t = 2h\frac{m_1 p}{1+e_1}\left(1-\frac{8}{\pi^2}\left(e^{-N}+\frac{1}{9}e^{-9N}\right)\right) \quad (6)$$

$$N = \frac{\pi^2 c_{vn}}{4h^2}t \quad (7)$$

$$c_{vn} = \frac{k(1+e_1)}{m_1 \rho} \quad (8)$$

где m_1 – коэффициент набухания сжатого слоя, отнесенный к ветви разгрузки компрессионной кривой;

k – коэффициент фильтрации, отнесенный к ветви разгрузки компрессионной кривой.

Полученные результаты скорости компенсационного деформационного поднятия (таблица 2) корректировались со значением предельного поднятия S_n и общим видом теоретической кривой поднятия (рисунок 2). Эта кривая должна иметь начальную часть с небольшим градиентом (в условиях неполной разгрузки), центральную – с максимальным и конечную, также с минимальным, со значениями, асимптотически приближающимися к условно максимальному значению упругого поднятия.

На основании приведенных грубых оценочных расчетов попробуем провести реконструкцию уровней озер и уклонов основных рек линии Ловать – Ильмень – Волхов – Ладожское озеро.

Таблица 2. Отметки условных урезов воды, приведенные к БС.

Table 2. Conventional water level marks given to the Baltic System.

лет назад	верховья Полы	оз. Ловатец	оз. Рдейское и другие	оз. Ильмень	р. Волхов, п. Грузино	юж. берег Ладожского озера
16000	249,7	166	92,6	12,3	12,5	2,9
15000	250,2	166,4	92,9	12,4	12,6	3,0
14000	251,0	166,9	93,2	12,5	12,6	3,0
13000	251,8	167,4	93,6	12,7	12,7	3,0
12000	252,6	168,1	94,1	13,0	12,9	3,1
11000	253,4	168,8	94,6	13,4	13,3	3,2
10000	254,3	169,5	95,2	13,9	13,6	3,4
9000	255,1	170,3	95,9	14,4	14,1	3,6
8000	256,0	171,1	96,5	14,9	14,6	3,7
7000	256,8	171,9	97,1	15,5	15,1	3,9
6000	257,5	172,6	97,8	16,0	15,5	4,1
5000	258,2	173,3	98,3	16,5	16,0	4,3
4000	258,8	173,9	98,9	17,0	16,4	4,5
3000	259,3	174,3	99,3	17,4	16,8	4,6
2000	259,6	174,6	99,7	17,7	17,1	4,8
1000	259,8	174,8	99,9	17,9	17,3	5,0
0	260	175	100	18	17,4	5,0
амплитуда	10,3	9	7,4	5,7	4,9	2,1

Вертикальные движения земной коры рассматриваемой территории являются тектоническими и гляциоизостатическими [Никонов, 1977]. На основании высокоточных измерений вертикальных движений земной коры А.А. Никонов приводит карту современных движений [Никонов, 1977], анализируя которую можно сделать вывод, что в настоящее время территория Южного Приильменья, долина р. Волхов и прилегающая к ней южная часть Ладоги находится в зоне слабых и умеренных опусканий, причем скорость таковых составляет 0-2 мм/год. По данным [Марков, 1933], Южная Швеция, Дания в районе проливов опустились на 40-60 метров за последние 8000 лет, что составило 5-7 мм/год. При этом [Шитов, 2007]

считает, что общее опускание (эндогенное) южного берега Ладоги за последние 10 тыс. лет составило 11 м.

Мощность слоя осадочных пород уже на южном побережье Ладожского озера не превышает 80 м, а на северном имеют место многочисленные выходы кристаллических пород – гранитов и гнейсов. Кристаллические породы дорифейского (архей, протерозой) возраста, выходящие на дневную поверхность на севере Карельского перешейка, представляют собой небольшую часть крупной региональной структуры (Восточно- Финляндская синклинорная зона), на юге уходящей под акваторию Ладожского озера и на северо-западе на территорию Финляндии. Упругого сжатия гранитов и гнейсов вследствие воздействия массы ледника быть не может, следовательно, все движения этой части суши (Фенноскандии) мы считаем эндогенными, в том числе произошедшими вследствие подвижек, которые были инициированы разгрузкой земной коры после таяния ледника [Subetto et al., 2018] и не связанными с упругими поднятиями в результате разгрузки от ледникового покрова. Данная точка зрения впервые высказана в [Николаев, 1967]. Наша реконструкция основана также на этом предположении.

Скорость поднятия Фенноскандии по геолого-геоморфологическим данным [Никонов, 1977] 10 тыс. лет назад достигала 4 см/год, плавно понижаясь до 10 мм/год 8 тыс. лет назад и в последние тысячелетия не превышала 3-5 мм/год. Таким образом, максимальное сводовое поднятие с центром в районе Ботнического залива за последние 7 тыс. лет не превысило 100 м, величина поднятия на юге Ладожского озера составила всего 0-3 м за этот же период [Никонов, 1977] (согласно нашей реконструкции – максимум компенсационного деформационного поднятия в этом месте – 2 м). В то же время, последние 3000 лет южный берег Ладоги опускается в 1-2 мм/год [Никонов, 1977], то есть за этот период опустился на 4-5 м. Предполагая, что скорость компенсационного поднятия осталась на прежнем уровне, попытаемся учесть предлагаемую в [Никонов, 1977] поправку (таблица 3). Однако, будем иметь в виду, что если вне зависимости от появления и схода ледника южный берег Ладоги опускался с одинаковой скоростью весь голоцен, то отметка на момент начала таяния ледника могла быть еще выше (около 14,0 м БС).

Как известно [Ramsay, 1931; Марков, 1933; Квасов, 1975; Субетто, 2007; Никонов, Энман, Флейфель, 2008], реконструкции послеледникового изостатического поднятия Ладожского озера – базиса эрозии Ильменской речной системы – проводилась неоднократно. Эти реконструкции основаны на анализе высотного положения исторических береговых линий, выраженных как в абразиях, террасах и береговых валах, так и в донных отложениях

береговых озер и торфяных отложениях болот. Сравнительные значения фиксированной условной точки современной отметки уреза воды приведены в таблице 3. В таблице 4 приводятся различные реконструкции отметок Ладожского озера.

Таблица 3. Изменения отметок значения современного уреза южного берега Ладожского озера по различным реконструкциям

Table 3. Changes in the elevation values of the modern shoreline of the southern shore of Lake Ladoga for various reconstructions

лет назад	уровень моря, м БС	Согласно [Никонов, Энман, Флейфель, 2008]	наша	наша, с учетом опускания
16000	-200	-33,5	2,9	14,1
15000	-195	-30	3,0	13,5
14000	-185	-26,5	3,0	12,8
13000	-175	-23	3,0	12,1
12000	-170	-19,5	3,1	11,6
11000	-160	-16	3,2	10,9
10000	-130	-12,5	3,4	10,4
9000	-100	-9	3,6	9,9
8000	-70	-5,5	3,7	9,3
7000	-40	-2	3,9	8,8
6000	-10	1,5	4,1	8,3
5000	-7	5	4,3	7,8
4000	-5	8,5	4,5	7,3
3000	-3	12	4,6	6,7
2000	-1	10	4,8	6,2
1000	0	8	5,0	5,7
0	0	5	5,0	5,0

Таблица 4. Отметки уровня Ладожского озера по различным реконструкциям

Table 4. Levels of Lake Ladoga for various reconstructions

лет назад	Согласно [Субетто, 2007]	Согласно [Амантов и др., 2016]	Согласно [Шитов, 2007]	Согласно [Марков, 1933]	на основе [Марков, 1933; Субетто, 2007; Амантов и др., 2016], с учетом опускания
12000	95-75	22		38-23	60
11000	45	10	13	32	40
10000	20	15		-3	13,5
9000	23	0		2,0	5
8000	17	15	9,5	5	11
7000	17	13	8	-1	11
6000	17	8	8	5	6
5000	20	7	7	7	4,5
4000	19	7	14,5	2	5
3000	19	20	16	14	11
2000	7	14	11	6	10
1000	6	6	8	5,5	7
0	5	5	5	5	5

Одну из первых попыток сделать расчет величины гляциоизостатического поднятия береговой линии сделал К.К. Марков еще в [Марков, 1933]. Он предложил производить расчет поднятия *h* через разность величин изостатического поднятия *e* и эвстатического (поднятия уровня моря) – *d*: $h = e - d$. Если *h* за период — величина положительная, то есть *e*>*d*, земная кора поднялась — водный бассейн регрессирует. Подобный расчет логичен при анализе динамики береговых линий водоемов, непосредственно связанных с морем, но в случае оценки изменений уровня озер, удаленных от общего базиса эрозии, данное построение не работает. Судите сами: при отступлении ледника за пределы нынешнего расположения Ладожского озера, уровень Мирового океана был намного ниже современного. Предположим, компенсационное поднятие береговой линии оз. Ильмень за 1000 лет составило 3 метра, а уровень моря за счет таяния ледников подрос на 30 метров, тогда получается, что береговая линия *h = 3 – 30* опустилась на 27 метров – регрессия озера? Относительно принятого нуля

БС, будет иметь место, как подъем отметки береговой линии, так и уровня моря. Но для самого озера ситуация никак не поменяется – ведь вместе с берегом поднимется и дно.

Задача всеобъемлющего анализа реконструкции уровенного режима Ладожского озера перед нами не стояла, тем не менее, мы старались учесть большинство возможных исследований по этому поводу [Марков, 1933; Квасов, 1975; Никонов, 1977; Субетто, 2007; Барац, 2008; Елфимов, 2008; Никонов, Энман, Флейфель, 2008]. Например, в качестве верхнего ограничения уровня воды мы используем отметки залегания торфяников возрастом от 9550 лет назад до 3400 лет назад на высотах примерно от 7 до 8,5 м БС вдоль существующей долины р. Нева. Уровень воды в р. Неве и Ладожском озере не мог быть выше высоты одновозрастных торфяников. Поскольку сами торфяники поменяли свою отметку как минимум на 5 м за этот период, то и уровень воды в Ладоге мог подниматься до 10-11 м.

Данные различных реконструкций исторических изменений уровня оз. Ильмень представлены в таблице 5. В 6 столбце – данные по изменениям в отметках Ладожского порога р. Волхов с учетом эндогенной просадки и абразионного размыва [Шуйский, Симеонова, 1976]. Они приведены к местоположению современного уреза пересчетом через условную отметку дна с учетом текущего заиления чаши озера. На представленных в [Васильева и др., 2012] рисунках, отметки уровня озера приняты равными 28,0 м БС на основании того, что Славенский и Юрьевский холмы г. Новгорода, имеющие отметки соответственно 27,5 и 28,1 м БС, 4-4,5 тыс. лет назад были затоплены. С учетом того, что абсолютные отметки холмов в то время были на 3,5 м ниже, максимальный уровень, скорее всего, не превышал отметок 20-24 м.

Оз. Ильмень имеет сток через р. Волхов в Ладожское озеро. При уровнях Ладожского озера меньших, чем 12,0 м, подпорных явлений на сток из оз. Ильмень быть не могло. Ладожские пороги, расположенные в 35 км от устья р. Волхов, за последние тысячелетия опускались со скоростью не меньшей, чем побережье [Никонов, 1977], то есть гребень порога с учетом размыва опустился не менее чем на 25 м. Поскольку сами пороги сложены кристаллическими породами, то компенсационное деформационное поднятие этого участка ничтожно, следовательно, отметка порогов 10-12 тыс. лет назад составляла около 37 м БС.

Большинство исследователей склоняется к варианту, что сток из оз. Ильмень проходил через р. Шелонь и далее по линии рек Уза, Петенка, Черёха, Великая, Нарва, Балтийское море [Васильева и др., 2012; Gorlach, Hang, Kalm, 2017]. Отметка водораздела на сегодняшний день 53,0 м. На геологических картах четвертичных отложений по рассматриваемой линии прослеживаются как ложбины стока ледниковых вод, так и

выраженные в современном рельефе древние долины. Отложения представлены озерно-ледниковыми и озерно-аллювиальными песчаными отложениями мощностью до 6 м.

Таблица 5. Изменения отметок озера Ильмень по различным реконструкциям

Table 5. Changes in elevations of Lake Ilmen for various reconstructions

лет назад	Отметки уровня по [Васильева и др., 2012]	Отметки дна озера, приведенные к БС	Отметки уреза по [Васильева и др., 2012], приведенные к БС	Отметки уреза, м БС, наша интерпретация	Отметки Ладожского порога, м БС
13000	110	-23	110,6	85	затоплен
12000	85	-19	82	60	затоплен
11000	55	-14	56,6	40	37,0
10000	26	-10	31	40	35,6
9000	18	-8	2	38	29,9
8000	18	-5	5,1	32	27,0
7000	18	-3	8,1	30	25,0
6000	18	0	11	30	23,0
5000	18	2	13,6	23	21,0
4000	26-30	4	21,7	22	19,4
3000	26-30	7	24,8	21	18,2
2000	26-30	9	25,4	19	17,6
1000	18	11	17,8	17	15,9
0	18	13	18	18	13,9

Примечание: Отметки дна озера даны с учетом заиления и поднятия

В таблице 6 дана реконструкция движения порогов, определяющих сток в тот или иной бассейн. Основываясь на этих данных, можно предположить, что отметкой, лимитирующей уровенный режим озера Ильмень, последние 10 тыс. лет, как и сейчас, являются отметки Ладожских порогов. Уклон р. Волхов, для различных уровней воды в озере, оценивался нами по уровню прохождения половодья 1885 года и по меженным уровням 1886[5], до постройки Волховской ГЭС.

[5] Озеро Ильмень. Карта озера и притоков. Составлена по исследованиям Ильменской описной партии в 1886-88 годах под руководством инженера С. Жвана и Молого-Мстинской описной партии в 1885 году под руководством инженера Э. Вилькена, изд-во МПС.

Таблица 6. Движения отметок водоразделов, замыкающих сток из оз. Ильмень

Table 6. The movement of the marks of the watershed, closing the runoff from the Lake Ilmen

Лет назад	уровень моря, м БС	отметка Шелонского водораздела	отметка Ладожского порога	Уровни, м БС	
				Ильмень	Ладога
13000	-175	затоплен (28,7)	затоплен (38,0)	85	лед
12000	-170	затоплен (31,1)	затоплен (37,5)	60	60
11000	-160	затоплен (35,3)	затоплен (37,0)	40	40
10000	-130	37,4	35,6	40	13,5
9000	-100	40,3	29,9	38	5
8000	-70	43	27,0	32	11
7000	-40	45,2	25,0	30	11
6000	-10	47,1	23,0	30	6
5000	-7	48,5	21,0	23	4,5
4000	-5	49,6	19,4	22	5
3000	-3	51,2	18,2	21	11
2000	-1	51,6	17,6	19	10
1000	0	51,8	15,9	17	7
0	0	53	13,9	18	5

Исходя из нашей реконструкции, сток по р. Шелони в сторону р. Великой прекратился около 10 тыс. лет назад, а не позже, как обычно считается [Васильева и др., 2012]. Обратного течения р. Волхова в Ильмень, скорее всего, не было, так как уровень оз. Ильмень всегда превышал отметку Ладожских порогов. Сток на север, через долину рек Мшага – Киба и далее в р. Луга также невозможен, поскольку отметки водораздела здесь еще выше (55-58 м), слой осадочных пород меньше, следовательно, упругие деформации тоже будут иметь меньшую амплитуду и, главное, время схода ледника и послеледникового подъема были более поздние.

Возраст верховьев наиболее крупных водотоков Южного Приильменья – рек Пола и Ловать составляет 13-14 тыс. лет. Их базисом эрозии служил уровень приледникового озера, образовавшегося на южной периферии отступающего ледника, который в свою очередь контролировался отметками водоразделов, через которые происходил сток воды в море. Первый базис эрозии – 85 м БС (Великие Луки), второй – 60 м БС (Дунаево). Дольше всего приледниковое озеро держалось на абсолютных отметках 40 м (устье Близнеи). Около

5 тыс. лет назад уровень стабилизировался на отметках 20-22 м БС (Черенчицы). Большие глубины в устьевых областях притоков озера позволяют предположить, что недавно отметки озера были несколько ниже современных, однако они не могли опускаться ниже отметок Ладожских порогов. Реки, хотя с геологической точки зрения достаточно молодые, в среднем и нижнем течении имеют выработанный продольный профиль.

Территория, занимаемая ныне бассейнами рек Полисть, Порусья, Редья, Холынья, Снежа, Перехода, Псижа, в период деградации ледника находились полностью под водой приледникового озера. Примерно 11 тыс. лет назад уровень озера понизился ниже отметок водораздела – болотного массива Красный Мох и Полисто-Ловатской болотной системы. С этого времени реки начинают свое существование.

В первоначальный период после отступления ледника все реки Южного Приильменья текли по почти плоскому дну, состоящему из флювиогляциальных отложений. Русла рек были обычно приурочены к доледниковым речным долинам. Преобладающим типом руслового процесса являлось свободное меандрирование, следы которого можно видеть до сих пор. Даже по коренным берегам водотоков на достаточном удалении от русла прослеживаются аллювиальные отложения различной мощности. Возраст этих русловых отложений, по качественной оценке, 5 тыс. лет и более. Затем, по мере понижения базиса эрозии, происходило врезание русел в водоупорные ледниковые отложения Валдайского горизонта. Базис эрозии – уровень оз. Ильмень – стабилизировался около 5 тыс. лет назад. В последнее тысячелетие вертикальный размыв резко усилился, что связано с преодолением трудноразмываемых флювиогляциальных четвертичных суглинистых пород и непосредственным воздействием потока на нижележащие девонские отложения [Johansson, 2018] и в настоящее время по нашей оценке достигает 1-3 см в год.

По мере врезания русел рек плановые деформации существенно замедлились. Русла развиваются, хотя и не полной мере, по типу вынужденного меандрирования с элементами ленточногрядового и побочневого типа руслового процесса по типизации Государственного гидрологического института[6].

Выводы

В результате воздействия ледникового покрова, имевшего мощность на исследуемой территории более 1000 м, величина деформационной просадки грунта составила примерно от

[6] Рекомендации по учету деформаций речных русел при проектировании инженерных сооружений на реках зоны Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 71 с.

12 м на южном берегу Ладожского озера до 50 м в верховьях р. Полы. Последующее компенсационное деформационное поднятие оценивается в разных частях территории от 2 до 10 м.

Формирование и эволюция речной сети Южного Приильменья во многом зависели от изменений базиса эрозии, в качестве которого на начальном этапе их развития выступало приледниковое озеро, затем Ладожское озеро, Волховские пороги и озеро Ильмень.

Возраст верховьев наиболее крупных водотоков Южного Приильменья – рек Пола и Ловать составляет 13-14 тыс. лет. Формирование рек Полисть, Порусья, Редья, Холынья, Снежа, Перехода, Псижа началось примерно 11 тыс. лет назад.

В первоначальный период после отступления ледника все реки Южного Приильменья текли по почти плоскому дну, состоящему из флювиогляциальных отложений. Преобладающим типом руслового процесса являлось свободное меандрирование. Затем, по мере понижения базиса эрозии, происходило врезание русел в водоупорные ледниковые отложения Валдайского горизонта. В последнее тысячелетие вертикальный размыв резко усилился, что связано с преодолением трудноразмываемых флювиогляциальных четвертичных суглинистых пород и непосредственным воздействием потока на нижележащие девонские отложения, и в настоящее время достигает 1-3 см в год. Плановое развитие русел рек существенно замедлилось, тип руслового процесса сменился на вынужденное меандрирование.

Литература

Амантов А.В., Амантова М.Г., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Гусенцова Т.М., Жамойда В.А., Фьелдскар В. Проблемы голоценового развития Южного Приладожья // Региональная геология и металлогения. 2016. № 65. С. 37-49

Барац Н.И. Механика грунтов: учебное пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. 106 с.

References

Amantov A.V., Amantova M.G., Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Gusentsova T.M., Zhamoida V.A., Fjeldskaar W. Problemy golotsenovogo razvitiya Yuzhnogo Priladozh'ya [On the question of Holocene development of south Lake Ladoga region]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [*Regional geology and metallogeny*], 2016, no. 65, pp. 37-49 (In Russian; abstact in English)

Barats N.I. *Mekhanika gruntov*: uchebnoe posobie [*Soil mechanics*]. Omsk, SibADI Publ., 2008. 106 p. (In Russian)

Васильева Н.В., Субетто Д.А., Вербицкий В.Р., Кротова-Путинцева А.Е. История формирования Ильмень-Волховского бассейна // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2012. №153(2). С. 141-147.

Виноградов А.Ю., Обязов В.А. Гляциоизостатическое поднятие Приильменской низменности в голоцене // Сборник научных трудов XXIV Международной научно-практической конференции «Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия» (Москва, 01-02 апреля 2018 г.). М.: Проблемы науки, 2018. С. 99-102.

Геология СССР. В 48 томах. Том I. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Геологическое описание. Северо-Западное территориальное / Гл. ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1971. 504 с.

Гроссвальд М.Г. Оледенение Русского Севера и Северо-Востока в эпоху последнего великого похолодания. М.: Наука, 2009. 152 с.

Chistyakov A.A., Makarova N.V., Makarov V.I. *Chetvertichnaya geologiya*: uchebnik [*Quaternary geology*]. Moscow, GEOS Publ., 2000. 303 p. (In Russian)

Dinamicheskaya geomorfologiya: Uchebnoe posobie [*Dynamic geomorphology*]. Moscow, MSU Publ., 1992. 448 p. (In Russian)

Elfimov V.I. *Izmenenie ust'evykh uchastkov rek v period prokhozhdeniya volny polovod'ya*: Ucheb. Posobie [*Change in estuarine sections of rivers during the passage of a flood wave*]. Moscow, RUDN Publ., 2008. 222 p. (In Russian)

Geologiya SSSR. V 48 tomakh. Tom 1. Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti. Geologicheskoe opisanie. Severo-Zapadnoe territorial'noe [*Geology of the USSR*. In 48 volumes. Volume 1. Leningrad, Pskov and Novgorod regions. Geological description. Northwest Territorial] / A.V. Sidorenko (ed.). Moscow, Publ. Nedra, 1971. 504 p.

Gorlach A., Hang T., Kalm V. GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus. *Boreas*, 2017, vol.46, iss.3, pp. 486-502. DOI: 10.1111/bor.12223.

Grosswald M.G. *Oledenenie Russkogo Severa i Severo-Vostoka v epokhu poslednego velikogo pokholodaniya [Ice sheets in the Russian North and North-Eastduring the last Great Chill]*. Moscow, Nauka Publ., 2009. 152 p. (In Russian; abstact in English)

Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-

Динамическая геоморфология: Учебное пособие / под ред. Г.С. Ананьева, Ю.Н. Симонова, А.И. Спиридонова. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.

Елфимов В.И. Изменение устьевых участков рек в период прохождения волны половодья: Учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. 222 с.

Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение-ние, 1992. 95 с.

Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Изд-во Наука. Лен. отд-ние, 1975. 279 с.

Марков К.К. Поздне- и послеледниковая история окрестностей Ленинграда на фоне поздне- и послеледниковой истории Балтики // Труды комиссии по изучению четвертичного периода. 1934. Т. IV. Вып. 1. С. 5-70

Марков К.К. Послеледниковая история юго-восточного побережья Ладожского озера // Вопросы географии. 1949. Выпуск 12. С. 213-220

Мернер Н.А. Обмеление моря. Засухи и вымирание млекопитающих // Катастрофы и история Земли: Новый униформизм / Под ред. У. 1. *Boreas*, 2016, vol. 45, iss.1, pp. 1-45. DOI: 10.1111/bor.12142.

Johansson P. Laser scanning technology in mapping and classifying of meltwater erosional forms in fell areas of Finnish Lapland. In Subetto D.A. et. al. (editors) *Excursion guide and Abstracts of INQUA Peribaltic Working Group Meeting and Excursion 2018 International Scientific Conference and School for Young Scientists «Lateglacial-Interglacial transition: glaciotectonic, seismoactivity, catastrophic hydrographic and landscape changes» (Petrozavodsk, August 19-25, 2018)*. Petrozavodsk, Publ. of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, 2018, pp. 71-72.

Kuznetsov V.V. *Fizika zemnykh katastroficheskikh yavlenii [Earth catastrophic physics]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992, 95 p. (In Russian)

Kvasov D.D. *Pozdnechetvertichnaya istoriya krupnykh ozer i vnutrennikh morei Vostochnoi Evropy* [*Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe*]. Leningrad, Nauka Publ., 1975, 279 p. (In Russian)

Markov K.K. Pozdne- i poslelednikovaya istoriya okrestnostei Leningrada na fone pozdne- i poslelednikovoi istorii Baltiki [Late and postglacial history of the vicinity of Leningrad against the background of late and postglacial history of the Baltic]. *Trudy komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda* [*Proceedings of the Commission for the Study of the Quaternary*], 1934, t. 4, iss. 1, pp. 5-70 (In Russian)

Markov K.K. Poslelednikovaya istoriya yugo-vostochnogo poberezh'ya Ladozhskogo ozera [Postglacial

Берггрена, Дж. Ван Кауверинга; Перевод с англ. Б.А. Борисова и др., под ред. В.Т. Фролова. М.: Мир, 1986a, с. 388-393.

Мернер Н.А. Эвстазия, изменения геоида и взаимодействия многих геофизических факторов // Катастрофы и история Земли: Новый униформизм / Под ред. У. Берггрена, Дж. Ван Кауверинга. Перевод с англ. Б.А. Борисова и др., под ред. В.Т. Фролова. М.: Мир, 1986b, с. 394-412.

Николаев Н.И. О новейшем этапе развития Фенноскандии, Кольского полуострова и Карелии // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. 1967. Т.42. № 1. С. 49–68

Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры (Геолого-геоморфологические и сейсмотектонические вопросы). М.: Наука, 1977. 240 с.

Никонов А.А., Энман С.В., Флейфель Л.Д. Голоценовые и современные движения земной коры в переходной зоне от Фенноскандинавского щита к Восточно-Европейской платформе в районе Ладожского грабена // Материалы XIV Междуна-

history of the southeastern coast of Lake Ladoga]. *Voprosy geografii* [*Questions of geography*], 1949, iss. 12, pp. 213-220 (In Russian)

Mörner N.-A. Low sea levels, droughts, and mammalian extinsions In W.A. Berggren, J.A. Van Couvering (ed.), *Catastrophes and Earth History: The New Uniformitarianism*. Princeton, New Jersey, Publ. Princeton University Press, 1984, pp. 387-394 (Russ. ed.: Merner N.A. Obmelenie morya. Zasukhi i vymiranie mlekopitayushchikh. In U. Berggrena, Dzh. Van Kauveringa (ed.) *Katastrofy i istoriya Zemli: Novyi uniformizm* Moscow, Publ. Mir, 1986a, pp. 388-393)

Mörner N.-A. Eustasy, geoid changes, and multiple geophysical interaction In W.A. Berggren, J.A. Van Couvering (ed.), *Catastrophes and Earth History: The New Uniformitarianism*. Princeton, New Jersey, Publ. Princeton University Press, 1984, pp. 395-416 (Russ. ed.: Merner N.A. Evstaziya, izmeneniya geoida i vzaimodeistviya mnogikh geofizicheskikh faktorov. In U. Berggrena, Dzh. Van Kauveringa (ed.), *Katastrofy i istoriya Zemli: Novyi uniformizm*. Moscow, Mir Publ., 1986b, pp. 394-412).

Nikolaev N.I. O noveishem etape razvitiya Fennoskandii, Kol'skogo poluostrova i Karelii [About the newest stage of development of Fennoscandia, the Kola Peninsula and Karelia]. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody, otdelenie geologii* [*Bulletin of the Moscow Society of Naturalists, Department of Geology*], 1967, t. 42, No 1, pp. 49–68 (In Russian)

Nikonov A.A. *Golotsenovye i sovremennye dvizheniya zemnoi kory (Geologo-geomorfologicheskie i seismotek-*

родной конференции «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными» (г. Петрозаводск, 27-31 октября 2018 года). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. Часть 2. С. 79–81.

Субетто Д.А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2007. № 1 (2). С. 111-120.

Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. Вузов / 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Чистяков А.А., Макарова Н.В., Макаров В.И. Четвертичная геология: учебник. М.: ГЕОС, 2000. 303 с.

Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое: Атлас палеогеографических карт: в 2 т. Т.2 / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: Геологический институт АН СССР, 1991. 106 с.

Шитов М.В. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера. Автореф. дисс. … канд. г.-м. наук. СПб., 2007. 17 с.

Шуйский Ю.Д., Симеонова Г.А. О влиянии геологического строения

tonicheskie voprosy) [*Recent crustal movements (Geological-geomorphological and seismotectonic aspects)*]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 240 p. (In Russian)

Nikonov A.A., Enman S.V., Fleifel' L.D. Golotsenovye i sovremennye dvizheniya zemnoi kory v perekhodnoi zone ot Fennoskandinavskogo shchita k Vostochno-Evropeiskoi platforme v raione Ladozhskogo grabena [Holocene and modern movements of the earth's crust in the transition zone from the Fennoscandinavian shield to the East Europe platform in the Ladoga graben area]. *Materialy chetyrnadtsatoi Mezhdunarodnoi konferentsii «Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi» (g. Petrozavodsk, 27-31 oktyabrya 2018)* [*Proceedings of the 14th international conference «Relationship between the surface and deep structures of the Earth's crust» (Petrozavodsk, October 27–31, 2008*] Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2008. Part 2, pp. 79–81. (In Russian)

Ramsay W. Changes of sea-level, resulting from the increase and decrease of glaciacion. *Fennia*, 1931, 52(5), pp. 1-62

Rinterknecht V., Hang T., Gorlach A., Kohv M., Kalla K., Kalm V., Subetto D., Bourlès D., Léanni L., Guillou V. The Last Glacial Maximum extent of the Scandinavian Ice Sheet in the Valday Heights, western Russia: Evidence from cosmogenic surface exposure dating using ^{10}Be. *Quaternary Science Reviews*, 2018, Vol. 200, pp. 106-113. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.09.032

Shel'fy Evrazii v mezozoe i kainozoe: Atlas paleogeograficheskikh kart: v 2 vol. Vol.2 [*Palaeogeographic atlas of the shelf regions of Eurasia for the mesozoic and cenozoic*]. Moscow, Publ. Geological Institute of the

морских берегов на процессы абразии // Доклады Болгарской академии наук. 1976. Т. 29. № 2. С. 57-79.

Gorlach A., Hang T., Kalm V. GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus // Boreas. 2017. Vol.46. Iss. 3. pp. 486-502, DOI: 10.1111/bor.12223.

Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1 // Boreas. 2016. Vol. 45. Iss. 1. pp. 1-45. DOI: 10.1111/bor.12142.

Johansson P. Laser scanning technology in mapping and classifying of meltwater erosional forms in fell areas of Finnish Lapland // Excursion guide and Abstracts of INQUA Peribaltic Working Group Meeting and Excursion 2018 International Scientific Conference and School for Young Scientists «Lateglacial-Interglacial transition: glaciotectonic, seismoactivity, catastrophic hydrographic and landscape changes» (Petrozavodsk, August 19-25, 2018) / edited by Subetto D. A. et al. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, 2018. pp. 71-72.

Academy of Sciences of the USSR, 1991. 106 p. (In Russian and English)

Shitov M.V. *Golotsenovye transgressii Ladozhskogo ozera. Avtoref. diss. kand. geol-min. najuk* [*Holocene transgressions of Lake Ladoga. Ph. D. (geological and mineralogical) thesis*]. SPb, 2007. 17 p. (In Russian)

Shuiskii Yu.D., Simeonova G.A. O vliyanii geologicheskogo stroeniya morskikh beregov na protsessy abrazii [On the influence of the geological structure of sea coasts on the processes of abrasion]. *Doklady Bolgarskoi Akademii Nauk* [*Reports of the Bulgarian Academy of Sciences*], 1976, vol. 29, no 2, pp. 57-79. (In Russian)

Stokes C.R. Deglaciation of the Laurentide Ice Sheet from the Last Glacial Maximum. *Cuadernos de Investigación Geográfica = Geographical Reseach Letters*, 2017, vol. 43, no. 2, pp. 377-428. DOI: 10.18172/cig.3237.

Subetto D.A. Istoriya formirovaniya Ladozhskogo ozera i ego soedineniya s Baltiiskim morem [The history of the formation of Lake Ladoga and its connection with the Baltic Sea]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)* [*Society. Environment. Development (Terra Numana)*], 2007, no 1 (2), pp. 111-120. (In Russian)

Subetto D.A., Shvarev S.V., Nikonov A.A., Zaretskaya N.E., Poleshchuk A.V., Potakhin M.S. New evidence of the Vuoksi River origin by geodynamic cataclysm. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 2018, vol. 90, pp 275-289, DOI: 10.17741/bgsf/90.2.010.

Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs)*: Uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [*Soil mechanics (short*

Ramsay W. Changes of sea-level, resulting from the increase and decrease of glaciacion. Fennia. 1931. 52(5). P. 1-62

Rinterknecht V., Hang T., Gorlach A., Kohv M., Kalla K., Kalm V., Subetto D., Bourlès D., Léanni L., Guillou V. The Last Glacial Maximum extent of the Scandinavian Ice Sheet in the Valday Heights, western Russia: Evidence from cosmogenic surface exposure dating using ^{10}Be // Quaternary Science Reviews. 2018. Vol. 200. P. 106-113. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.09.032

Stokes C.R. Deglaciation of the Laurentide Ice Sheet from the Last Glacial Maximum // Cuadernos de Investigación Geográfica = Geographical Reseach Letters. 2017. Vol 43. No 2. P.377-428 DOI: 10.18172/cig.3237.

Subetto D.A., Shvarev S.V., Nikonov A.A., Zaretskaya N.E., Poleshchuk A.V., Potakhin M.S. New evidence of the Vuoksi River origin by geodynamic cataclysm // Bulletin of the Geological Society of Finland. 2018. Vol. 90. P. 275-289. DOI: 10.17741/bgsf/90.2.010.

course)]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1983. 288 p. (In Russian)

Vasilieva N.V., Subetto D.A., Verbitsky V.R., Krotova-Putintseva A.E. Istoriya formirovaniya Il'men'-Volkhovskogo basseina [History of the Ilmen-Volkhov Basin Development]. *Izvestiya Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena* [*Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*], 2012, no. 153(2), pp. 141-150. (In Russian; abstract in English)

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A. Glyatsioizostaticheskoe podnyatie Priil'menskoi nizmennosti v golotsene [Glacio-isostatic uplift of the Priilmen lowland in the Holocene]. *Sbornik nauchnykh trudov chetyrnadtsatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye issledovaniya: klyuchevye problemy tret'ego tysyacheletiya» (Moskva, 01-02 aprelya 2018)* [*Collection of scientific papers of the fourteenth International scientific-practical conference "Scientific research: key problems of the third millennium" (Moscow, April 01-02, 2018)*], Moscow, Problems of science Publ., 2018, pp. 99-102. (In Russian)

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS

УДК 551.322

О РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ НА СКЛОНЕ

П.А. Черноус

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

pchernous48@gmail.com

Аннотация. Прогнозирование возникновения лавин в отдельно взятом лавинном очаге, как правило, основывается на интерпретации физико-механических характеристик снежного покрова. Обычно это достаточно грубые измерения, выполненные в отдельных точках склона. Пространственная изменчивость измеряемых характеристик и ошибки измерений могут существенно влиять на качество исходных данных для оценки устойчивости снега на склоне и на результаты такой оценки. Используемые в настоящее время системы пространственного мониторинга характеристик снега, определяющих его устойчивость на склоне, не имеют под собой рациональной основы. В работе рассмотрены принципы рациона-

ON RATIONALIZATION OF THE SNOW CHARACTERISTIC MEASUREMENTS FOR THE ASSESSMENT OF SNOWPACK STABILITY ON A SLOPE

Pavel A. Chernous

Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far East Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

pchernous48@gmail.com

Abstract. Interpretation of the physical and mechanical characteristic measurements of the snowpack is a base for avalanche release prediction. The spatial variability of the measured characteristics and measurement errors can affect the quality of the initial data for assessing the snowpack stability on a slope and results of this assessment. The work describes principles of rationalization for the measurements of the characteristics that influence on snow stability on a slope. The fields of these characteristics and errors of their measurements were considered as random. A few quality criteria for networks measuring snow characteristics on

Chernous P.A. On rationalization of the snow characteristic measurements for the assessment of snowpack stability on a slope. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 114-142 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.005

лизации измерений характеристик снежного покрова, определяющих его устойчивость на склоне. При этом поля этих характеристик и ошибки методов их измерений рассматривались, как случайные. Определены критерии качества сети измерений характеристик снега на склоне. Даны оценки параметров пространственной статистической структуры (дисперсий и автокорреляционных функций) для полей толщины, плотности, температуры и сцепления снежного покрова на склонах в различных горных районах. Оценены ошибки методов измерений характеристик снега, в том числе с помощью экстраполяции эмпирической автокорреляционной функции в ноль. Показано, что в различных ландшафтах пространственные схемы измерений должны быть различными. Проанализировано влияние различных схем измерений на качество интерпретации получаемых с их помощью данных с целью оценки возможности возникновения лавин.

Использование существующих детерминированных методов интерпретации точечных измерений характеристик снега, выполненных традиционными методами для оценки его устойчивости на склоне, приводит к неправильным заключениям о лавинной опасности. Для оценки устойчивости снега на склоне предлагается использование методов статистического моделирования, основанных на детерминированных моделях механической устойчивости снега, входные данные для которых генерируются на основе точечных измере-

a slope are used. The study includes estimates of the parameters of the spatial statistical structure (variances and autocorrelation functions) for the fields of thickness, density, shear strength and temperature of snowpack on slopes in various mountain regions. Errors of methods for measuring snow characteristics were estimated. It is shown that in different landscapes, spatial patterns of the point measurements should be different. The influence of spatial measurement schemes on the quality of snowpack stability interpretation is analyzed for different parameters of spatial statistical structure of the snow characteristics and accuracy their measurements.

The use of conventional deterministic methods for interpretation of point measurements of snowpack characteristics to assess its stability on the slope can and does lead to incorrect conclusions. The way out of this situation can be the use of statistical simulation based on deterministic models of mechanical stability of snowpack, the input data for which are generated on the basis of point measurements of snow characteristics and previously obtained parameters of their spatial statistical structure. Probabilistic estimates obtained with statistical simulation

ний характеристик снега и ранее полученных параметрах их пространственной статистической структуры. Вероятностные оценки, полученные с помощью статистического моделирования, отражают неопределенность входной информации в вероятностном заключении об устойчивости снега.

Ключевые слова: лавинный очаг; характеристики снега; пространственная изменчивость; измерения; точность; устойчивость снега; лавины.

reflect the uncertainty of the input information in the probabilistic conclusion about the snowpack stability.

Keywords: avalanche starting zone; snowpack characteristics; spatial variability; measurements; accuracy; snowpack stability; avalanches.

Введение

Качество оценки устойчивости снега на склоне и возможности возникновения лавин зависит от того насколько правильно применяемые для этих целей модели описывают процесс возникновения лавины и от того насколько полно эти модели обеспечены данными о характеристиках снега, определяющих его устойчивость на склоне. В настоящей работе обсуждаются вопросы получения качественных данных для моделей механической устойчивости снега на склоне. В лавиноведении этот вопрос почти не обсуждался, поскольку особого выбора в объеме и разнообразии данных не было, в силу сложности, трудоемкости и опасности их получения из мест зарождения лавин. Тем не менее, регулярные измерения высоты - H, плотности - ρ, временного сопротивления сдвигу (сцепления) - C, температуры снега – t и некоторых других его характеристик проводятся для диагностики лавинной опасности. Их проведение предписываются руководствами по снеголавинным работам[1,2]. При этом не дается пояснений какова должна быть точность этих измерений и как их можно интерпретировать в пространстве. Часто говорится о репрезентативности мест измерений, но само это понятие не конкретизируется и количественно не оценивается. При использовании таких данных трудно объяснить с чем связаны ошибки в результатах моделирования неустойчивых состояний снега на склоне – с неадекватностью моделей или неточностью используемых данных. Как правило, измерения проводятся совсем не в тех местах где они необходимы для моделирования, а свойства снега очень изменчивы в пространстве. Причем в

[1] Руководство по снеголавинным работам (временное). Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 397 с.
[2] Руководство по снеголавинным работам. СПБ.: Гидрометеоиздат, 2000. 134 с.

различных физико-географических условиях эта изменчивость различна. В связи с этим возникают вопросы – где, в каком количестве и с какой точностью надо проводить измерения, которые соответствовали бы требованиям, предъявляемым к входным данным моделей возникновения лавин?

Методическая основа рационализации измерений характеристик снега

Для ответов на поставленные выше вопросы была использована теория рационализации точечных измерений характеристики ξ в случайном поле с заданными параметрами [Дроздов, Шепелевский, 1946; Казакевич, 1977; Жуковский, Киселева, Мандельштам, 1978]. Эти параметры получаются на основе специальных измерений характеристик снега с высоким пространственным разрешением. Важным моментом при этом является получение параметров, отражающих изменчивость на относительно небольших участках склонов, имеющих характерный линейный размер лавинного очага либо его части. Обычно, порядка 100 м. Очевидно, что данные об изменчивости, получаемые при стандартных маршрутных снегосъёмках, предназначенных для оценки запасов воды на значительных территориях, не соответствуют требуемому масштабу оценок. Эти маршруты слишком длинные и учитывают вклад низкочастотной составляющей в изменчивость, которая для характерных для лавинного очага размеров отсутствует. Кроме того, из-за большого интервала между измерениями, с их помощью невозможно оценить вклад в общую дисперсию короткопериодных флуктуаций, учёт которых важен при статистическом моделировании пространственных распределений характеристик снежного покрова для определения его устойчивости В качестве параметров пространственной статистической структуры полей характеристик снега могут использоваться оценки дисперсий σ_ξ^2 , пространственных автоковариационных – $R_\xi(l)$, нормированных автокорреляционных – $r_\xi(l)$ и структурных функций $B_\xi(l)$, полученные в различных ландшафтах в различных горных районах. Оценки дисперсий σ_ξ^2 характеризуют диапазон разброса характеристики ξ, а нормированных автокорреляционных функций $r_\xi(l)$, - связность значений характеристики ξ в пространстве.

В качестве критериев качества сети пространственного мониторинга характеристик снега могут рассматриваться ошибки интерполяции между измерениями (чаще линейной интерполяции), ошибки замены средней интегральной величины на определенной площади средним арифметическим измерений на этой площади и ошибки замены математического ожидания средним арифметическим измерений. Приведенные в настоящей работе оценки получены в предположении того, что поля характеристик снега являются однородными и

изотропными, а ошибки измерений случайными. Средняя квадратичная ошибка линейной интерполяции $E_\xi(l)$ на середину отрезка l, соединяющего две точки, в которых проведены измерения характеристики ξ, оценивалась с помощью выражений:

$$E_\xi^2(l) = 1{,}5\sigma_\xi^2 + 2R_\xi(0{,}5l) + 0{,}5R_\xi(l) + 0{,}5\Delta_\xi^2 \qquad (1)$$

где Δ_ξ^2 – дисперсия ошибок измерения ξ. Либо:

$$E_\xi^2(l) = B_\xi(0{,}5l) - 0{,}25B_\xi(l) + 0{,}5\Delta_\xi^2 \qquad (2)$$

Уравнение (1) можно переписать в безразмерном виде:

$$\varepsilon_\xi^2(l) = 1{,}5 - 2r_\xi(0{,}5l) + 0{,}5r_\xi(l) + 0{,}5\eta_\xi^2 \qquad (3)$$

где $\varepsilon_\xi(l) = E_\xi/\sigma_\xi$ – мера ошибки интерполяции;

$\eta_\xi = \Delta_\xi/\sigma_\xi$ – мера ошибки измерения.

Часто для оценки снегонакопления в лавинном очаге и связанного с ним прогнозом лавинной опасности нужна информация о характеристике снега ξ, относящаяся не к отдельным точкам, а ко всей его площади S или некоторой ее части. Таким образом, необходимо оценить среднее интегральное значение

$$\xi_S = \frac{1}{S}\iint_{(S)} \xi(x,y)dxdy \qquad (4)$$

где $\xi(x,y)$ – истинное значение характеристики ξ в точке лавинного очага или некоторой его части S с координатами x и y.

Обычно за оценку среднего интегрального значения принимается среднее арифметическое:

$$\overline{\xi'} = \frac{1}{n}\sum_1^n \xi_i' \qquad (5)$$

где ξ_i' - измеренное значение характеристики ξ в точке i;

n – количество точек, в которых произведены измерения.

Здесь и далее горизонтальная черта над символом или выражением означает операцию осреднения. В качестве оценки точности замены среднего интегрального значения

ξ_S средним арифметическим $\bar{\xi}'$ используются величины абсолютной и относительной ошибок такой замены:

$$\overline{\beta_\xi^2} = \overline{(\bar{\xi}' - \xi_S)^2} \tag{6}$$

и

$$\gamma_\xi^2 = \frac{\overline{\beta_\xi^2}}{\sigma_\xi^2} \tag{7}$$

Для случая, когда рассматриваемое случайное поле является однородным и изотропным, а погрешности измерений случайны, аддитивны и не коррелированы с измеряемой величиной можно рассчитать величину γ_ξ для произвольной конфигурации измерительной сети. Для случая, когда площадь S разбита на n равновеликих квадратов, в центрах которых проводятся измерения, а поля характеристики ξ описываются степенной или экспоненциальной корреляционными функциями, имеются готовые решения для определения γ_ξ [Жуковский, Киселева, Мандельштам, 1978]. В настоящей работе приведены оценки γ_ξ для случая аппроксимации $r_\xi(l)$ степенными функциями вида:

$$r_\xi(l) = 1 - (l/l_0)^k \tag{8}$$

Ошибка γ_ξ описывается следующим соотношением:

$$\gamma_\xi = \sqrt{\frac{\eta_\xi^2}{n} + C_1(k)\left(\frac{\sqrt{S}}{l_0}\right)^k \frac{1}{n^{1+k/2}}} \tag{9}$$

Значения коэффициента $C_1(k)$ для некоторых k даны в таблице 1.

Таблица 1. Значения функции $C_1(k)$

Table 1. Function $C_1(k)$ values

k	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$C_1(k)$	1,00	0,76	0,58	0,45	0,33	0,24	0,18	0,11	0,07	0,03	0,00

В ряде задач, например, при статистическом моделировании неустойчивых состояний снега [Божинский, Черноус, 1986; Chernous, Fedorenko, 1998] вместо математического ожидания m_ξ характеристики ξ используется среднее арифметическое – $\bar{\xi}'$, полученное по

данным измерений в n произвольных точках поля. В качестве характеристики надежности такой оценки можно использовать средний квадрат ошибки

$$\overline{\theta_{\xi}^{2}} = \overline{(\bar{\xi}' - m_{\xi})^{2}} \quad (10)$$

При отсутствии корреляции между измерениями в отдельных точках, а также для некоррелированных с измеряемой величиной погрешностей измерений, $\overline{\theta_{\xi}^{2}}$ определяется следующим выражением:

$$\overline{\theta_{\xi}^{2}} = \frac{\sigma_{\xi}^{2} + \Delta_{\xi}^{2}}{n} \quad (11)$$

Или переходя к относительным единицам

$$\alpha_{\xi}^{2} = \frac{\overline{\theta_{\xi}^{2}}}{\sigma_{\xi}^{2}} = \frac{1 + \eta_{\xi}^{2}}{n} \quad (12)$$

При наличии корреляции между измерениями величина α_{ξ} определяется следующим выражением:

$$\alpha_{\xi} = \sqrt{\frac{1 + \eta_{\xi}^{2}}{n}\left[1 + \frac{2}{n}\sum_{i<j}\frac{1}{1 + \eta_{\xi}^{2}}\, r_{\xi}(l_{i,j})\right]} \quad (13)$$

Знание эмпирических автокорреляционных функций позволяет оценить случайную составляющую ошибки измерений Δ_{ξ} [Алексеев, 1975] как:

$$\Delta = \sigma_{\xi}'\left[1 - r_{\xi}'(0)\right]^{0,5} \quad (14)$$

где σ_{ξ}' оценка среднего квадратического отклонения σ_{ξ},

$r_{\xi}'(0)$ значение эмпирической автокорреляционной функции, экстраполированное в l=0

Величину σ_{ξ}, обусловленная исключительно пространственной изменчивостью ξ определяется как:

$$\sigma_{\xi} = \sigma_{\xi}'\left[r_{\xi}'(0)\right]^{0,5} \quad (15)$$

Высота (толщина) снега

Для оценки снегонакопления в лавинных очагах используются такие характеристики, как высота снежного покрова и толщина снежного покрова. Высота измеряется вдоль вертикали, а толщина по нормали к склону. Это связанные между собой характеристики, но по ряду причин при оценке устойчивости снега на склоне используются и та и другая. Высота снега в лавинных очагах обычно измеряется с помощью снегомерных реек, отсчеты по которым выполняются с помощью бинокля или другого оптического прибора. Иногда измерения высоты и толщины снега производятся с помощью других измерительных средств. Например, с помощью ультразвуковых датчиков. Еще реже для этих целей используется лазерное сканирование и стереофотограмметрическая съемка. Рассмотрим наиболее распространенные измерения с помощью снегомерных реек. Точность единичного измерения складывается из ошибки отсчитывания и так называемой ошибки градуировки. Ошибка градуировки связана с точностью изготовления и правильностью установки рейки. Цена деления существующих снегомерных реек 0,1 м и 0,5 м. Рейки с раскрашенными в черный и белый цвета 10 сантиметровыми делениями обычно используются в тех местах где отсутствует отложение изморози на них, а расстояния с которых производятся отсчеты сравнительно малы. Рейки с ценой деления 50 см (расстояние между поперечными планками) используются в местах где наблюдается интенсивное отложение изморози и расстояния до наблюдателя велики. В частности, в Хибинах. Ошибки градуировки могут быть устранены более тщательным изготовлением реек и правильной их установкой. Поэтому здесь они не рассматриваются. Рассмотрим ошибки отсчитывания. Величина $\Delta X_{отсч}$ – это конечно случайная ошибка и как правило оценивается наблюдателем субъективно, как ответ на вопрос «за что я ручаюсь?» [Соловьев, Яхонтова, 1977]. Обычно, если цена деления d, то наблюдатель может указать: $\Delta X_{отсч} = 0,5d$ при округлении до целых делений; $\Delta X_{отсч} = 0,3d$, если отсчитываются целые деления и половины; $\Delta X_{отсч} = 0,1d$, если удается хорошо отсчитывать на глаз десятые доли деления.

Для определения $\Delta X_{отсч}$ в Хибинах в апреле 1983 г. был поставлен следующий эксперимент. По шести рейкам, находящихся от места наблюдений на расстоянии 2100-2300 м, 12 работников цеха противолавинной защиты комбината «Апатит» (ЦПЗ) сделали отсчеты с помощью 12-тикратного бинокля. Погода была благоприятной, видимость хорошей, время на отсчеты не лимитировалось. В соответствии с действующими в цехе правилами отсчеты выполнялись с точностью до 0,1 м. После этого путем прямых измерений

на месте, выступающих над поверхностью снега частей реек, была определена высота снега в местах установки реек. По данным эксперимента была построена гистограмма числа случаев измерений с ошибками в определенных градациях (рисунок 1).

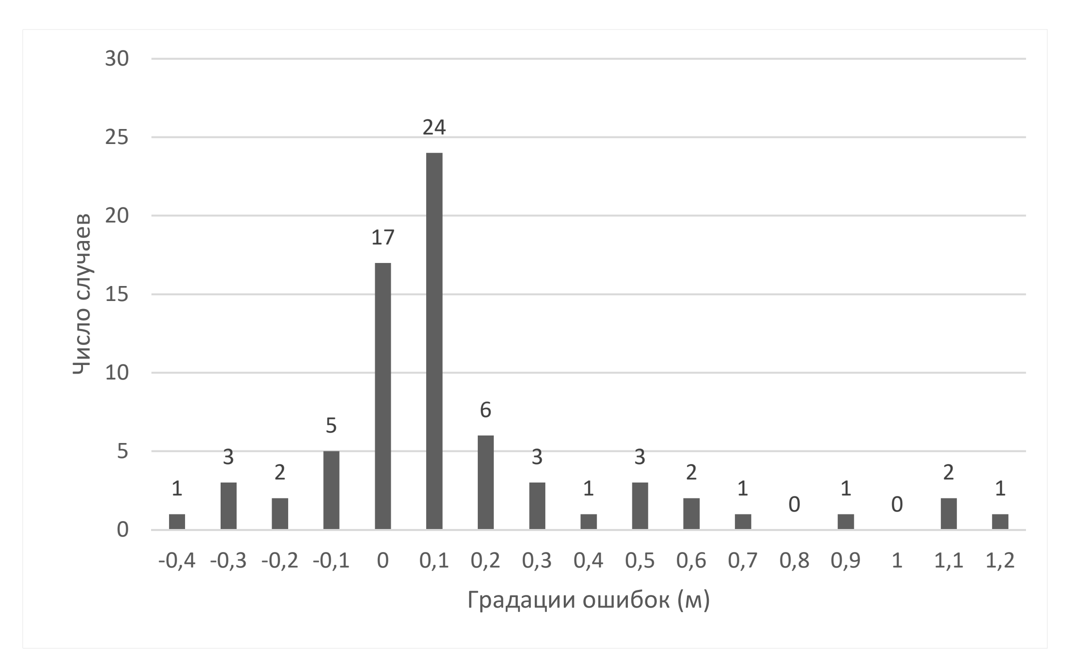


Рисунок 1. Распределение числа случаев измерений с ошибками в заданных градациях

Figure 1. Distribution of the number of measurements with errors in given gradations

Очевидно, что требуемая точность с помощью этого метода измерений недостижима. Относительная частота ошибок $|\Delta X_{отсч}| > 0{,}3$ м равна примерно 0,17. Вообще говоря, определение интервала, в котором находится истинная высота снега, должно проводиться с очень высокой доверительной вероятностью, поскольку ошибочные данные при использовании их для оценки лавинной опасности могут привести к неверным выводам об устойчивости снега и связанным с этим большим ущербом. В то же время, с увеличением доверительной вероятности растет и величина доверительного интервала, то есть интервала, внутри которого с выбранной доверительной вероятностью лежит истинное значение измеряемой величины. В данном эксперименте оценка доверительной вероятности для интервала ошибки $|\Delta X_{отсч}| \leq 0{,}3$ м составила лишь 0,83. В год проведения эксперимента снегомерная сеть ЦПЗ состояла из примерно 300 снегомерных реек. Это означает, что примерно по 17 рейкам высота снега была занижена на 0,3 м и более (см. Рисунок 1). Точность метода хорошо характеризуют данные другого эксперимента. В мае 1983 г. во второй половине дня при идеальной видимости и прочих благоприятных погодных условиях были проведены измерения высот снега по 19 рейкам, расположенных на расстояниях от 600 до

2000 м от мест наблюдений. Измерения по каждой рейке с помощью 12-тикратного бинокля выполняли 9-10 наблюдателей, в число которых входили и наиболее опытные работники цеха ЦПЗ. Стандартные отклонения измерений в сериях измерений по отдельным рейкам оказались в диапазоне от 0,06 м до 0,36 м. Очевидно, что требуемая точность не обеспечивается. Еще хуже обстоит дело с определением приростов (убыли) снега по отдельным рейкам *h'*. Если принять представленные на рисунке 1 относительные частоты в качестве оценок вероятностей попадания ошибок отсчетов высот снега по рейкам в различные интервалы, а также полагая, что вероятности ошибок предыдущего и последующего отсчетов не связаны между собой, то можно вычислить вероятности попадания ошибки истинного прироста снега в определенный интервал (Таблица 2).

Таблица 2. Оценки доверительной вероятности интервалов *h'* различной величины
Table 2. Assessments of the fiducial probability of intervals *h'* of various sizes

Доверительный интервал (м)	Оценка доверительной вероятности
h'±0,1	0,47
h'±0,2	0,61
h'±0,3	0,72
h'±0,4	0,86
h'±0,5	0,95
h'±0,6	0,97
h'±0,7	0,98
h'±0,8	0,997

Конечно, столь низкая точность получаемой о приростах снега информации ставит под сомнение целесообразность такого метода измерений. Причины низкой точности измерений высот снега легко объяснимы. Увеличение, которое дает 12 кратный бинокль, недостаточно для того, чтобы надежно отсчитать десятые доли метра. Кроме того, изображение рейки постоянно «трясется», поскольку малейшее смещение бинокля приводит на таких расстояниях к большим смещениям поля зрения бинокля. Сейчас в некоторых службах используются бинокли со стабилизацией изображения либо фотосъемка реек с последующей оценкой высоты снега по снимкам. По-видимому, эти приемы повышают точность измерений, но ее оценка пока не проводилась.

Следующий вопрос, требующий ответа, – на какое расстояние от точки измерений можно распространять полученные в ней значения высоты снега? То есть насколько репрезентативны получаемые данные и насколько полно имеющаяся снегомерная сеть отражает снегонакопление в лавинных очагах. Как было сказано выше, ответ на этот вопрос тесно связан с пространственной изменчивостью поля высоты снежного покрова, которая различна для районов с различной подстилающей поверхностью, режимом ветра, осадков и некоторых других метеорологических факторов. В настоящей работе использованы результаты специальных измерений, выполненных автором [Черноус, Христоев, 1986; Черноус, Барашев, Федоренко, 2010; Черноус, Селиверстов, Сучков, 2015; Черноус, Осокин, Чернов, 2018; Chernous, Fedorenko, Barashev, 2006, 2008] в Хибинах (1986 – 2009 гг.), на Алтае (Семинский хребет, 2008 г.), в Восточной Сибири (Байкальский хребет, 2009 г.) и на Кавказе (хребет Аибга, 2013 г.), на Шпицбергене (г. Улав, 2015 г.) для определения параметров пространственной статистической структуры полей общей толщины снежного покрова H и ее верхнего слоя h на малых площадях на горных склонах. Характеристика участков измерений представлены в таблице 3. Величины H и h необходимы для расчетов устойчивости всего снежного покрова, возможности возникновения лавин прямого действия (из верхнего слоя снега) и оценки дополнительной нагрузки, вызываемой приростом снега. Измерения H проводились в профилях, направленных вдоль линии падения склона и вдоль горизонталей с помощью щупа, с ценой деления 1 см. Толщина верхнего слоя измерялась линейкой, при этом в месте измерения выкапывался шурф до нижележащего слоя. Наиболее многочисленные измерения проводились в Хибинах - около пяти тысяч. От нескольких сотен до тысячи измерений проведены в других вышеупомянутых местах. Кроме того, на Семинском, Байкальском хребтах и хребте Аибга из-за большой общей толщины снега измерения проводились от поверхности до наиболее глубокого хорошо выраженного слоя. Измерения толщины верхнего слоя снега проводились во всех районах. В Хибинах средняя толщина снежного покрова в профилях измерений варьировалась от 0,1 м до 1,5 м. Величины σ'_H также менялись от профиля к профилю. Однако, прослеживается довольно четкая зависимость осредненных по градациям $\overline{H'}$ значений σ'_H от средней толщины снежного покрова. Величина σ'_H равномерно возрастает в интервале средней толщины от 0,1 до 0,5 м, а далее, с возрастанием средней высоты, остается постоянной, равной 0,3 – 0,4 м. Средняя толщина верхнего слоя (свежеметелевый снег) в профилях измерений варьировались от 0,04 м до 0,23 м, σ'_h от 0,04 м до 0,16 м, а коэффициенты вариации c_v от 0,1 до 1,4.

Таблица 3. Краткая характеристика участков наблюдений

Table 3. Brief description of study plots

Район	Долгота (град.)	Широта, (град)	Высота (м)	Крутизна, (град.)	Экспозиция	Подстил. поверхность
Хибины, гора Айкуайвенчорр	33,77	67,60	500-1100	10-30	ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ	Обломочный материал, старый снег
Семинский хребет	85,61	51,04	1700-1800	10	В, СВ	Старый снег
Байкальский хребет	108,80	55,74	1000-1200	15-20	С	Старый снег
Хребет Аибга	40,29	43,64	1500-2000	25-35	С	Старый снег
Шпицберген, гора Улав	78,06	14,23	100-150	15	ЗЮЗ	Задернован. грунт
	78,07	14,26	300-400	30	ЗСЗ	Скальная поверхность
Зап. Тянь-Шань	41,16	70,07	2000			Травянистая

Ниже приведены эмпирические нормированные автокорреляционные функции общей толщины снега H и его верхнего слоя h, полученные в Хибинах осреднением по всем профилям, в которых проводились измерения:

$$r'_H(l) = 0{,}94exp(-0{,}22l^{0{,}67}) \quad (16)$$

$$r'_H(l) = 0{,}94[1-(0{,}02l)^{0{,}33}] \quad (17)$$

$$r'_h(l) = 0{,}9exp(-0{,}34l^{0{,}63}) \quad (18)$$

$$r'_h(l) = 0{,}9[1-(0{,}05l)^{0{,}38}] \quad (19)$$

Осредненные эмпирические корреляционные функции $r'_H(l)$, полученные по измерениям в горизонтальных профилях и профилях, направленных вдоль линии наибольшего падения склона, практически совпадают, что свидетельствует об изотропности поля H.

Ошибки линейной интерполяции $\varepsilon_H(l)$ в поле толщины снега H для различных η_H представлены в таблице 4.

Таблица 4. Значения ошибок линейной интерполяции толщины снежного покрова $\varepsilon_H(l)$ в зависимости от расстояния между точками измерений l и ошибок измерений η_H для поля с корреляционной функцией (16).

Table 4. Errors of linear interpolation of snowpack thickness $\varepsilon_H(l)$ depending on the distance between measurement points l and measurement errors η_H for the field with the correlation function (16)

l, м	η_H						
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	1,5
0	0,00	0,07	0,14	0,21	0,35	0,71	1,06
3	0,56	0,57	0,58	0,60	0,67	0,90	1,20
5	0,66	0,66	0,67	0,69	0,74	0,96	1,25
10	0,79	0,80	0,81	0,82	0,87	1,06	1,33
20	0,94	0,94	0,95	0,96	1,00	1,18	1,42
30	1,02	1,02	1,03	1,04	1,08	1,24	1,47
50	1,11	1,11	1,12	1,13	1,16	1,31	1,53
70	1,15	1,15	1,16	1,17	1,20	1,35	1,57
100	1,19	1,19	1,19	1,20	1,24	1,38	1,59

Значение ошибки интерполяции $\varepsilon_H(l)$ для существующей в хибинских лавинных очагах измерительной сети с характерным расстоянием между снегомерными рейками – 50 м и присущими методу определению высоты снега ошибкам Δ_H – 0,25 м (как было показано выше эта ошибка еще больше) и σ_H – 0,4 м, равняется примерно 1,2. Ошибка E_H при этом составит почти полметра. Ошибки интерполяции в поле h представлены в таблице 5. В силу различия в автокорреляционных функций, значения $\varepsilon_h(l)$ при небольших l несколько выше (до 20%) аналогичных значений $\varepsilon_H(l)$. С увеличением l эта разница уменьшается и на расстоянии между измерениями в 50 м не превышает 5%, для l = 100 м она менее 2%. При этом абсолютные ошибки интерполяции E_h в основном будут меньше, чем E_H из-за разницы в σ_h и σ_H. Однако ошибки, отнесенные к толщине снега в точке интерполяции, которые являются наиболее важными при оценке устойчивости снега на склоне, для h будут значительно выше, чем для H.

Таблица 5. Значения ошибок линейной интерполяции толщины верхнего слоя снега $\varepsilon_h(l)$ в зависимости от расстояния между точками измерений l и ошибок измерений η_h для поля с корреляционной функцией (18).

Table 5. The values of errors of linear interpolation of the thickness of the upper snow layer $\varepsilon_h(l)$ depending on the distance between the measurement points and measurement errors for a field with the correlation function (18).

l, м	*η*						
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	1,5
0	0,00	0,07	0,14	0,21	0,35	0,71	1,06
3	0,68	0,68	0,70	0,71	0,77	0,98	1,26
5	0,78	0,78	0,79	0,81	0,85	1,05	1,32
10	0,91	0,92	0,92	0,94	0,98	1,15	1,40
20	1,04	1,04	1,05	1,06	1,10	1,26	1,49
30	1,10	1,11	1,11	1,12	1,16	1,31	1,53
50	1,17	1,17	1,17	1,18	1,22	1,36	1,58
70	1,19	1,19	1,20	1,21	1,24	1,39	1,60
100	1,21	1,21	1,22	1,23	1,26	1,40	1,61

Значения ошибок γ_H представлены для поля с автокорреляционной функцией (17) в таблице 6. Согласно расчетам, при η_H = 0,25, ошибка γ_H замены средней интегральной величины на площади S = 1000 м^2 измерением по одной снегомерной рейке, установленной в лавинном очаге в центре квадрата со стороной чуть больше 30 м, равна примерно 0,8. При этом ошибка β_H, отнесенная к средней величине H = 1 м равна 0,32. Хотя оценки γ_H несколько меньше (не более чем на 5%), чем γ_h (таблица 7) для поля с автокорреляционной функцией (18), на практике, за счет того, что $\sigma_H > \sigma_h$, чаще всего, абсолютная ошибка $\beta_H > \beta_h$. Как и в случае с интерполяцией, ошибка замены среднего интегрального значения средним арифметическим, отнесенная к средней толщине слоя, будет существенно больше для h чем для H. Величины ошибок α_H^2 оценивались для случая, когда измерения проводятся в n равноотстоящих точках, расположенных на отрезке прямой, длиной L.

$$\alpha_\xi^2 = \frac{1+\eta_\xi^2}{n}\left[1 + 2\sum_m^{n-1}\left(1-\frac{m}{n}\right)\frac{1}{1+\eta_\xi^2}\, r_\xi\left(\frac{Lm}{n-1}\right)\right] \tag{20}$$

Таблица 6. Ошибки замены средней интегральной толщины снежного покрова средним арифметическим $\gamma_H(l)$ при различных S , n и η_H для поля с корреляционной функцией (17).

Table 6. Errors of substitution of the mean integral value of the snowpack thickness by mean arithmetical $\gamma_H(l)$ for various S, n and η_H for a field with the correlation function (17).

n	1 м^2	10 м^2	100 м^2	1000 м^2
	$\eta = 0$			
1	0,43	0,52	0,63	0,76
2	0,29	0,35	0,42	0,51
5	0,17	0,21	0,25	0,3
10	0,11	0,14	0,16	0,2
20	0,08	0,09	0,11	0,13
50	0,04	0,05	0,06	0,08
	$\eta = 0,1$			
1	0,44	0,53	0,64	0,77
2	0,30	0,43	0,43	0,51
5	0,18	0,25	0,25	0,3
10	0,12	0,17	0,17	0,2
20	0,08	0,11	0,11	0,13
50	0,05	0,07	0,07	0,08
	$\eta = 0,2$			
1	0,48	0,56	0,66	0,79
2	0,32	0,38	0,44	0,53
5	0,19	0,22	0,25	0,31
10	0,13	0,15	0,18	0,21
20	0,09	0,10	0,12	0,14
50	0,05	0,06	0,07	0,08
	$\eta = 0,5$			
1	0,66	0,72	0,8	0,91
2	0,46	0,50	0,55	0,62
5	0,28	0,30	0,33	0,37
10	0,19	0,21	0,23	0,25
20	0,14	0,14	0,16	0,17
50	0,08	0,09	0,1	0,11

Таблица 7. Ошибки замены средней интегральной толщины верхнего слоя снега средним арифметическим $\gamma_h(l)$ при различных S, n и η_h для поля с корреляционной функцией (19).

Table 7. Errors of substitution of the mean integral value of the upper snow layer thickness by mean arithmetical $\gamma_h(l)$ for various S, n and η_h for a field with the correlation function (19).

n	1 м^2	10 м^2	100 м^2	1000 м^2
	η = 0,0			
1	0,44	0,54	0,68	0,84
2	0,29	0,36	0,45	0,56
5	0,17	0,21	0,26	0,32
10	0,11	0,14	0,17	0,21
20	0,07	0,09	0,11	0,14
50	0,04	0,05	0,07	0,08
	η = 0,1			
1	0,45	0,55	0,69	0,85
2	0,30	0,37	0,45	0,56
5	0,17	0,21	0,26	0,33
10	0,12	0,14	0,18	0,22
20	0,08	0,09	0,12	0,14
50	0,04	0,05	0,07	0,08
	η = 0,2			
1	0,48	0,58	0,71	0,87
2	0,32	0,39	0,47	0,58
5	0,19	0,23	0,28	0,34
10	0,13	0,15	0,18	0,22
20	0,09	0,10	0,12	0,15
50	0,05	0,06	0,07	0,09
	η = 0,5			
1	0,66	0,74	0,84	0,98
2	0,46	0,51	0,57	0,66
5	0,28	0,31	0,34	0,39
10	0,19	0,21	0,23	0,27
20	0,13	0,14	0,16	0,18
50	0,08	0,09	0,10	0,11

Таблица 8. Ошибки замены математического ожидания средним арифметическим для поля общей толщины снежного покрова α_H при различных L, n и η_H и корреляционной функцией (16).

Table 8. Errors of substitution of mathematical expectation by mean arithmetical α_H for various L, n and η_H for a field with correlation (16).

n	10 м	20 м	50 м	100 м
	$\eta = 0$			
2	0,83	0,77	0,73	0,71
4	0,80	0,72	0,61	0,55
6	0,80	0,71	0,59	0,50
10	0,80	0,71	0,57	0,47
20	0,80	0,71	0,57	0,45
30	0,80	0,71	0,57	0,45
	$\eta = 0{,}2$			
2	0,84	0,79	0,64	0,72
4	0,81	0,73	0,62	0,55
6	0,80	0,72	0,59	0,50
10	0,80	0,72	0,58	0,47
20	0,80	0,72	0,57	0,46
30	0,80	0,72	0,57	0,45
	$\eta = 0{,}5$			
2	0,90	0,85	0,81	0,79
4	0,84	0,76	0,66	0,60
6	0,82	0,74	0,62	0,54
10	0,82	0,73	0,60	0,49
20	0,81	0,72	0,58	0,47
30	0,81	0,72	0,58	0,46

Как видно (Таблица 8), ошибки α_H довольно велики и даже очень значительное увеличение количества измерений в профиле не позволит ее уменьшить.

Увеличение длины профиля позволяет это сделать, но при этом результат уже не будет соответствовать характерному размеру лавинного очага или его части. Повысить точность определения математического ожидания можно повысить, проводя площадные

измерения и усредняя оценки математических ожиданий, полученные в различных профилях. Либо выбирая такую измерительную сеть, которая делает ошибку α_H, рассчитанную с помощью (13), удовлетворительной для моделирования неустойчивых состояний снега на склоне. В Хибинах для снегомерной сети с размещением точек измерения через 30 м значения α_H^2 можно рассчитывать по формуле для некоррелированных измерений:

$$\alpha_H^2 = \frac{1+\eta^2}{n} \qquad (21)$$

Учитывая, что связность поля h ниже, чем поля H, ошибки α_h будут меньше аналогичных ошибок α_H, а для их расчетов можно использовать выражение (21) при расстояниях между точками измерений не менее 20 м.

Оценки параметров пространственной статистической структуры толщины снежного покрова на небольших участках склонов в других горных районах очень малочисленны. Оценки автокорреляционных функций и дисперсий толщины снега на Шпицбергене показывают, что разброс ее значений в пространстве (дисперсии) аналогичен тому, который наблюдается в Хибинах. Пространственные связи (автокорреляционные функции) на Шпицбергене убывают с расстоянием быстрее чем в Хибинах. Характерные радиусы корреляции, на которых осредненная корреляционная функция убывает в *e* раз, по измерениям в Хибинах составляет около 10 м, а на Шпицбергене 5 - 6 м. Полученные на Кавказе радиусы корреляции (около 18 м) больше, чем в Хибинах, а дисперсии несколько меньше [Черноус, Селиверстов, Сучков, 2015]. Эмпирические структурные функции, полученные в Западном Тянь-Шане, показывают, что радиусы корреляции общей толщины снежного покрова H измеряются многими десятками метров [Чиркова, 1977a]. Максимальные величины σ_H на момент максимального снегонакопления достигают 0,3 м в районе перевала Камчик и 0,07 в районе снеголавинной станции Дукант [Чиркова, 1977b]. На Алтае и на Байкальском хребте стандартные отклонения толщины снежного покрова и верхних его слоев при измерениях в профилях оказались значительно меньше, чем для профилей с аналогичной средней толщиной снега в Хибинах. Если для Хибин для слоя средней толщиной 0,5 м и больше они составляли 0,3 - 0,4 м, то на Алтае и на Байкальском хребте не превышали 0,07 м, а для верхних слоев снега средней толщиной до 0,4 м находились в пределах 0,02-0,04 м. Аналогичные показатели для Кавказа находятся в диапазоне 0,06 – 0,19 м. Коэффициенты вариации толщины снега на склонах в Хибинах (0,1 - 1,4 для верхнего слоя снега) были также значительно выше, чем в других районах: Алтай и Байкальский хребет – 0,06 – 0,17; Кавказ – 0,07 – 0,3 [Черноус, Селиверстов, Сучков, 2015]. Очевидно, что чем выше связность поля (чем больше радиусы

корреляции) и чем меньше разброс значений характеристики в пространстве (чем меньше σ_ξ), тем меньше ошибки интерполяции и замены среднего интегрального значения средним арифметическим. Например, наблюдая за высотой снега по двум рейкам с ценой деления 0,1 м (ошибка измерения Δ_H = ± 0,05 м) в горах Тянь-Шаня в районе снеголавинной станции «Дукант», находящимися в 50 м друг от друга, с помощью интерполяции можно обеспечить определение высоты снега в промежуточных точках с точностью ± 0,1 м. Таким же методом можно добиться примерно таких же ошибок интерполяции на Алтае и Байкальском хребте. В районе перевала Камчик и на Кавказе ошибки интерполяции будут уже в разы больше. Самые большие ошибки ε_H ε_h γ_H γ_h α_H α_h наблюдаются в Хибинах и на Шпицбергене. Относительная ошибка α_h замены математического ожидания средним арифметическим для поля толщины свежеметелевого снега в Хибинах близка к такой ошибке для поля общей толщины снежного покрова. Различия составляют не более 20%.

Плотность снега

Полевые измерения для определения пространственной статистической структуры плотности снега проводились главным образом в верхнем слое (свежеметелевый снег). Наиболее многочисленные измерения (около 2000 измерений) проводились в Хибинах в тех же самых профилях, что и измерения толщины снега, с интервалом между измерениями 1 м. Измерения проводились с помощью плотномера в виде дюралевого цилиндра диаметром 52 мм и длиной 240 мм, а также лабораторного динамометра со шкалой в 400 г, градуировка которого выполнена непосредственно в значениях плотности с ценой деления 0,02 г/см^3. Средняя плотность в отдельных профилях изменялась от 0,18 г/см^3 до 0,27 г/см^3, а коэффициенты вариации от 0,05 до 0,17. Какой-либо зависимости между средней плотностью и стандартным отклонением не обнаружено. Как и для толщины снежного покрова, значения эмпирической автокорреляционных функции плотности, полученные осреднением по всем промерным профилям, аппроксимировались экспоненциальной и степенной зависимостями:

$$r'_\rho(l) = 0{,}7exp(-0{,}43l^{0{,}50}) \quad (22)$$

$$r'_\rho(l) = 0{,}7[1 - (0{,}03l)^{0{,}29}] \quad (23)$$

Экстраполяция значений эмпирической корреляционной функции в ноль показывает, что величина средней квадратической ошибки измерений составляет около $0{,}5\sigma_\rho$ и находится в интервале 0,005 – 0,02 г/см^2. Как и для толщины снежного покрова, корреляционные связи в

поле плотности резко падают с расстоянием. Причем, наибольшее уменьшение корреляционной функции происходит при l < 5 м. Данные о таких характеристиках пространственной статистической структуры полей плотности на небольших участках горных склонов, как корреляционная или структурная функции для большинства горных районов отсутствуют. В то же время, сравнивая коэффициенты вариации плотности, полученные нами для районов Алтая и Байкальского хребта – 0,04 – 0,12 [Черноус, Селиверстов, Сучков, 2015], а также полученные ранее для районов Западного Тянь-Шаня и Приэльбрусья [Войтковский, Голубев, Войтковский, 1986], с этой же характеристикой, полученной в Хибинах для свежеметелевого снега, можно отметить, что пространственная изменчивость плотности свежеметелевого снега в Хибинах наиболее высока. Реально можно добиться точности интерполяции равной σ_ρ. Значения ошибки линейной интерполяции ε_ρ в зависимости от расстояния между точками измерений l и величины η, рассчитанные с помощью (3), почти не отличаются от аналогичных оценок, полученных для толщины слоя свежеметелевого снега (см. таблицу 5). Их максимальные различия не превышают 7% и на практике в качестве оценок ε_ρ могут использоваться оценки ε_h. Учитывая, что коэффициенты вариации плотности в других районах меньше, чем в Хибинах, относительные ошибки интерполяции, отнесенные к средней величине плотности, в этих районах будут меньше, чем в Хибинах. В других районах, для которых имеются оценки ε_h, можно попытаться использовать их для оценки качества интерполяции плотности снега. При определении ошибки оценки замены математического ожидания средним арифметическим аналогичны ошибкам α_ρ.

Временное сопротивление сдвигу (сцепление)

Из-за трудоемкости получения, данные для определения пространственной статистической структуры поля временного сопротивления сдвигу получены лишь в Хибинах и Западном Тянь-Шане [Канаев, 1969; Божинский, Черноус, 1986]. В Хибинах измерения проводились по методике ТНИИС[3] с помощью рамки 10х10 см^2 и динамометра. Измерялось сопротивление быстрому сдвигу, при котором время приложения нагрузки не превышало одной-двух секунд. Поскольку испытания проводились с очень незначительной нормальной нагрузкой (толщина сдвигаемого образца не превышала 5 см), полученные значения сопротивления сдвигу можно принять равными прочности снега на сдвиг или сцеплению C. Измерения проводились вдоль тех же профилей, в которых проводились измерения толщины

[3] Руководство по снеголавинным работам (временное). Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 397 с.

и плотности снега, с интервалом 1 м. Все измерения проводились в верхнем слое снега (свежеметелевый снег). Средние значения в сериях измерений изменялись от 0,2 кПа, для слегка уплотненного ветром снега, до 3,1 кПа, для хорошо выраженной снежной доски. Стандартные отклонения в сериях менялись от 0,08 до 0,7 кПа, а коэффициенты вариации от 0,06 до 0,86. Для более надежной характеристики структуры поля сцепления все корреляционные функции, полученные в сериях измерений, были усреднены и сглажены:

$$r'_C(l) = 0{,}72exp(-0{,}37l^{0{,}64}) \quad (24)$$

$$r'_C(l) = 0{,}72[1-(0{,}05l)^{0{,}40}] \quad (25)$$

Полученные данные свидетельствуют о том, что пространственная изменчивость сцепления для свежеметелевого снега в Хибинах очень велика. Экстраполяция значений эмпирической корреляционной функции в ноль показывает, что величина верхнего предела средней квадратической ошибки измерений сцепления в свежеметелевом снеге составляет, как и для плотности, около 0,5σ и находится в интервале 0,04-0,35 кПа. Большинство коэффициентов вариации в проведенных сериях измерений сцепления менялись от 0,23 до 0,33. Так как полученные коэффициенты вариации сцепления примерно в 2-4 раза больше, чем коэффициенты вариации плотности, относительная ошибка метода измерений сцепления в 2-4 раза выше, чем плотности. Значения ошибки линейной интерполяции ε_C в зависимости от расстояния между точками измерений l и величины η, рассчитанные с помощью (3), близки к аналогичным ошибкам ε_h для толщины свежеметелевого снега. Максимальные различия не превышают 3%. Для их получения, как и для плотности, можно пользоваться зависимостями, представленными в таблице 5. Как и для полей толщины и плотности свежеметелевого снега, простейшей и достаточно точной оценкой ошибки линейной интерполяции в поле сцепления является σ_C. Относительная ошибка $\frac{\varepsilon_C}{\bar{C}}$, как и ошибка измерений $\frac{\Delta_C}{\bar{C}}$, для сцепления в 2-4 раза выше, чем для плотности. Для получения относительных ошибок замены среднего интегрального значения сцепления средним арифметическим γ_C можно воспользоваться таблицей 7. Максимальные различия с аналогичными ошибками для толщины свежеметелевого снега не превышают 2%. Ошибки замены математического ожидания средним арифметическим α_C при измерении сцепления в профиле длиной L в n равноотстоящих точках практически совпадают с аналогичными ошибками для толщины свежеметелевого снега α_h. Для случая, когда расстояния между точками измерений не меньше 12 м, получить оценки α_C можно с помощью (21).

Возможности сравнения параметров пространственной изменчивости сцепления *C* в Хибинах с такими же параметрами, полученными в других физико-географических условиях очень ограничены. Их оценки получены лишь для свежевыпавшего снега в Западном Тянь-Шане. Коэффициенты вариации сцепления, полученные для свежевыпавшего снега в Западном Тянь-Шане находятся в диапазоне 0,07 – 0,44 [Канаев, 1969]. Причем лишь в четырех сериях измерений из тридцати трех значения коэффициентов вариации оказались больше 0,25. Радиус корреляции для корреляционной функции сцепления свежевыпавшего снега, полученной в Западном Тянь-Шане, значительно больше 50 м, а эмпирическая корреляционная функция при $l = 0$ очень близка к 1 [Канаев, 1969].

Температура снега

Пока в моделях оценки устойчивости снега на склоне эта характеристика востребована менее всего. Однако без нее не обойтись в моделях, учитывающих вязкие свойства снега, на которые температура оказывает большое влияние. Измерения в Хибинах показали, что температура снега обладает наименьшей пространственной изменчивостью по сравнению с рассмотренными выше характеристиками. По результатам наблюдений в Хибинах выявлена довольно высокая отрицательная корреляция температуры снега и его плотности (r = -0,63 – -0,89).

Фактор устойчивости

Так называемый коэффициент (фактор, индекс) устойчивости снега на склоне *K* [Москалев, Канаев, 1979] является неким комплексным показателем определяющий его устойчивость в отдельной точке склона. *K* представляет собой отношение временного сопротивления сдвига к сдвигающей силе и в простейшем виде выглядит, как:

$$K = \frac{C + f\rho g h(\cos\psi)^2}{\rho g h \sin\psi \cos\psi} \tag{26}$$

где f – коэффициент трения;

ψ – угол склона;

h – высота снежного слоя.

Относительную ошибку *K,* даже не учитывая ошибки в определении f и ψ, а также ошибки интерполяции, можно записать в виде:

$$\left|\frac{\Delta K}{K}\right| = \left|\frac{\Delta C}{C}\right| + \left|\frac{\Delta \rho}{\rho}\right| + \left|\frac{\Delta h}{h}\right| \quad (27)$$

где ΔK, ΔC, $\Delta \rho$, Δh – абсолютные ошибки соответствующих величин.

Характерные значения относительных ошибок измерений C, ρ и h традиционными методами равны примерно 20%, 5% и 60% соответственно. Таким образом,. относительная ошибка определения K на основании прямых измерений близка к 100%. Если учесть, что высота снежной доски (прирост или убыль высоты снега) в точке определяется, как разность двух отсчетов, сделанных через некоторый промежуток времени, что увеличивает ошибку в ее определении еще в 1,4 раза, а значения C и ρ в этой точке получается с помощью интерполяции (как и высота доски в промежуточных между измерениями точках), то можно говорить уже о сотнях процентов относительной ошибки в определении K в Хибинах традиционными методами. Кроме того, пока мало что известно о пространственной изменчивости коэффициента трения - f, да и ошибки в его определения различными методами пока остаются не оцененными. Наибольший вклад в ошибку K связан с точностью измерения высоты снега. Решив эту проблему, можно существенно улучшить качество оценок устойчивости снега. Второй по величине вклад в ошибку оценки устойчивости снега вносит сцепление. Точность его измерения низкая, а пространственная изменчивость высокая. Судя по характеристикам пространственной статистической структуры полей высоты снега и сцепления, полученным на Западном Тянь-Шане, а также учитывая точность получения данных о высоте снега, получаемых там, можно говорить, что возможности более точной оценки K в районе снеголавинной станции «Дукант» на порядок выше чем в Хибинах.

Обсуждение результатов

Как показывают проведенные исследования, пространственная изменчивость характеристик снега на склонах оказывает большое влияние на качество исходных данных, необходимых для диагностики и прогнозирования возникновения лавин. Прежде чем применять те или иные модели механической устойчивости снега на склоне, надо понять, как ошибки в исходных данных могут повлиять на результаты расчетов. К сожалению, такие исследования не проводились. Помимо ошибок собственно измерений, большую неопределенность в исходные для моделирования данные вносит пространственная изменчивость характеристик снега. Результаты исследований, приведенные в настоящей работе, показывают каким образом можно оценить качество снеголавинной информации с

учетом ошибок собственно измерений и пространственной изменчивости характеристик снега. Хотя параметры пространственной статистической структуры характеристик снега оценены лишь для небольшого числа географических районов и ландшафтов, некоторые выводы можно сделать уже сейчас. Параметры этой структуры связаны с характером подстилающей поверхности и климатическими факторами, свойственными каждому ландшафтному типу. Например, можно отметить большую пространственную изменчивость (большие величины σ и малые радиусы корреляции) характеристик снега в районах с циклоническим типом погоды (особенно это выражено в переходных зонах океан – суша) и неоднородным микрорельефом подстилающей поверхности, чем в районах с антициклоническим типом погоды и однородным, сглаженным микрорельефом подстилающей поверхности. Можно также отметить схожесть связности полей различных характеристик снега в одном и том же районе или схожих районах (рисунок 2). Это внушает некоторый оптимизм, заключающийся в том, что параметры пространственной статистической структуры характеристики снега, для которой они получаются наиболее доступными методами (например, высоты снега), могут быть использованы в качестве оценок этих параметров для других характеристик, используемых для оценки устойчивости снега. Значительно повысить точность определения *K* можно используя лазерное сканирование [Бойко, Погорелов, 2012] для определения высоты снега во всех необходимых для определения устойчивости точках.

Заключительные замечания

Кратко сформулировать выводы можно так:

- традиционные измерения характеристик снега в лавинных очагах, особенно высоты (толщины) и прочности нуждаются в существенном повышении точности;
- используемые в настоящее время системы пространственного мониторинга характеристик снега, определяющих его устойчивость на склоне, не имеют под собой рациональной основы и должны быть изменены;
- существуют методы, позволяющие рационализировать этот процесс, однако фундаментальные свойства снежного покрова, определяющие пространственную статистическую структуру полей характеристик снега, контролирующих его устойчивость на склоне, изучены недостаточно для этих целей;

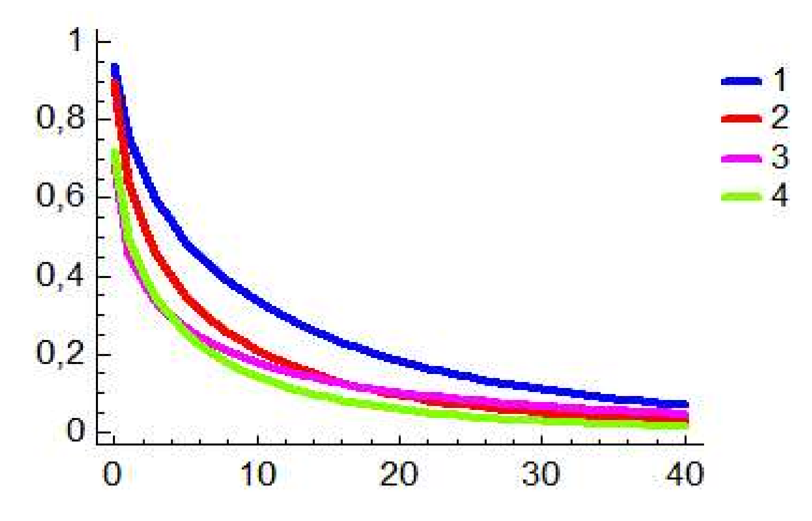


Рисунок 2. Величины нормированных корреляционных функций общей толщины снега (1), толщины верхнего слоя (свежеметелевого) снега (2), плотности верхнего слоя (свежеметелевого) снега (3), сцепления верхнего слоя (свежеметелевого) снега (4) в Хибинах.

Figure 2. Standard autocorrelation functions for total snowpack thickness (1), upper snow layer thickness (2), density of upper snow layer (3), shear strength of upper snow layer (4) in the Khibiny Mountains.

- для определения параметров пространственной статистической структуры полей характеристик снега на малых площадях на склонах в различных ландшафтах требуются массовые измерения этих характеристик с высоким пространственным разрешением;
- при традиционных методах точечных измерений характеристик снега в лавинных очагах не существует универсальной методики их пространственного мониторинга, пригодной для использования в любых ландшафтах. Пространственное размещение точек измерений необходимо выбирать с учетом точности измерений и параметров пространственной статистической структуры измеряемой характеристики;
- приведенные в настоящей работе данные о пространственной статистической структуре характеристик снега в различных регионах могут быть использованы для планирования сети их пространственного мониторинга в этих регионах;
- использование существующих детерминированных методов интерпретации точечных измерений характеристик снега, выполненных традиционными методами, для оценки его устойчивости на склоне может привести и приводит к неправильным заключениям о лавинной опасности;

- выходом из создавшегося положения может быть использование для оценки устойчивости снега на склоне статистического моделирования, основанного на детерминированных моделях механической устойчивости снега, входные данные для которых генерируются на основе точечных измерений характеристик снега и ранее полученных параметрах их пространственной статистической структуры;
- вероятностные оценки, полученные с помощью статистического моделирования, отражают неопределенность входной информации в вероятностном заключении об устойчивости снега.

Литература

Алексеев Г.А. Методы оценки случайных погрешностей гидрометеорологической информации. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 96 с.

Божинский А.Н., Черноус П.А. Вероятностная модель устойчивости снега на склонах гор // Материалы гляциологических исследований. 1986. Вып. 55. С. 53-60.

Бойко Е.С., Погорелов А.В. Применение лазерного сканирования в исследованиях рельефа и снежного покрова. Морфометрический аспект. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. 147 с.

Войтковский К.Ф., Голубев В.Н. Войтковский В.К. Пространственная изменчивость строения и свойств снежного покрова на склонах гор // Вестник МГУ. Серия V. География. 1986. № 1. С. 80-86.

References

Alekseev G.A. *Metody otsenki sluchainykh pogreshnostei gidrometeorologicheskoi informatsii. [Methods of assessment of random errors of hydrometeorological information].* Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1975. 96 p. (In Russian)

Boiko E.S., Pogorelov A.V. *Primenenie lazernogo skanirovaniya v issledovaniyakh rel'efa i snezhnogo pokrova. Morfometricheskii aspect [The use of laser scanning in studies of topography and snow cover. Morphometric aspect].* Novosibirsk, Publ. Geo, 2012. 147 p. (In Russian)

Bozhinskii A.N. Chernous P.A. Veroyatnostnaya model' ustoichivosti snega na sklonakh gor [A probabilistic model of snow stability on mountain slopes]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovanii [Materials of glaciological studies]*, 1986, iss. 55, pp. 53-60. (In Russian; abstract in English).

Chernous P.A., Barashev N.V., Fedorenko Yu.V. Izmenchivost' kharakteristik snega i obrazovanie lavin [Variability of snow characteristics and the formation of avalanches]. *Led i sneg [Ice and snow]*, 2010, no 3 (111), pp. 27-36 (In Russian)

Дроздов О.А., Шепелевский А.А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети // Труды НИУГУГМС. 1946. Вып. 13. Серия 1. С. 65-115.

Жуковский Е.Б., Киселева Е.Л., Мандельштам С.М. Статистический анализ случайных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 408 с.

Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 320 с.

Канаев Л.А. Об изменчивости свойств снега // Тр. САРНИГМИ. 1969. Вып. 44 (59). С. 25–42.

Москалев Ю.Д., Канаев Л.А. Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 200 с.

Соловьев В.А., Яхонтова В.Е. Элементарные методы обработки результатов измерений. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1977. 73 с.

Черноус П.А., Барашев Н.В., Федоренко Ю.В. Изменчивость характеристик снега и образование лавин //

Chernous P., Barashev N., Fedorenko Yu. Spatial variability of snow characteristics and snow stability. *Proceedings of "International Snow Science Workshop 2008" (September 21st - September 27th 2008, Whistler, British Columbia, Canada).* Whistler, 2008, pp. 948-949

Chernouss P.A., Fedorenko Yu.V. Probabilistic evaluation of snow-slab stability on mountain slopes. *Annals Glaciology*, 1998, vol. 26, pp. 303-306. DOI: 10.3189/1998aog26-1-303-306

Chernous P., Fedorenko Yu., Barashev N. Spatial variability of some snow characteristics on a slope and interpretation of measurements for snow stability assessment. *Proceedings of "International Snow Science Workshop 2006" (October 1 - 6, 2006, Telluride, CO).* Telluride, 2006, pp. 339-348

Chernous P.A., Khristoev Yu.V. Otsenka tochnosti dannykh o tolshchine snega v lavinosborakh [Evaluation of the accuracy of data on the snow thickness in avalanche sites]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovanii [Materials of glaciological studies],* 1986, publ. 55, pp. 201–206. (In Russian)

Chernous P.A., Osokin N.I., Chernov R.A. Prostranstvennaya izmenchivost' tolshchiny snezhnogo pokrova na gornom sklone (arkhipelag Shpitsbergen) [Spatial variability of the snow depth on mountain slope in Svalbard]. *Led i sneg [Ice and snow]*, 2018, vol 58, no 3, pp. 353-358. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-353-358 (In Russian; abstract in English)

Chernous P.A., Seliverstov Yu.G., Suchkov V.E. Vliyanie kharakteristik snega na lavinoobrazovanie [Snow variability effect upon avalanching]. *Led i sneg*

Лёд и снег. 2010. № 3 (111). С. 27-36

Черноус П.А., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Пространственная изменчивость толщины снежного покрова на горном склоне (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. №58(3). С. 353-358. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-353-358

Черноус П.А., Селиверстов Ю.Г., Сучков В.Е. Влияние характеристик снега на лавинообразование // Лёд и Снег. 2015. № 55 (2). С. 53–59. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59

Черноус П.А., Христоев Ю.В. Оценка точности данных о толщине снега в лавиносборах // Материалы гляциологических исследований. 1986. Вып. 55. С. 201–206.

Чиркова А.А. Особенности структурных функций глубины снежного покрова в зависимости от характера рельефа лавинных очагов // Труды САРНИГМИ, 1977а, вып. 37 (118). С. 43-50.

Чиркова А.А. Статистический анализ распределения глубины снежного покрова на малых площадях в

[Ice and snow], 2015, vol 55, no 2, pp. 53-59. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59 (In Russian; abstract in English)

Chirkova A.A. Osobennosti strukturnykh funktsii glubiny snezhnogo pokrova v zavisimosti ot kharaktera rel'efa lavinnykh ochagov [Features of the structural functions of the snow depth depending on the character of the relief of avalanche starting zones]. *Trudy SARNIGMI* [*Proceedings of Middle Asia Regional Research Hydrometeorological Institute*], 1977a, publ. 37 (118), pp. 43-50. (In Russian)

Chirkova A.A. Statisticheskii analiz raspredeleniya glubiny snezhnogo pokrova na malykh ploshchadyakh v gorakh [Statistical analysis of the snow depth distribution on small areas in the mountains] *Trudy SARNIGMI* [*Proceedings of Middle Asia Regional Research Hydrometeorological Institute*], 1977b, publ. 32 (113), pp. 40-54. (In Russian)

Drozdov O.A., Shepelevskii A.A. Teoriya interpolyatsii v stokhasticheskom pole meteorologicheskikh elementov i ee primenenie k voprosam meteorologicheskikh kart i ratsionalizatsii seti [The theory of interpolation in a stochastic field of meteorological elements and its application to issues of meteorological maps and network rationalization]. *Trudy NIUGUGMS [Proceedings of Research Establishment of Main Department of Hydrometeorology]*, 1946, iss, 13, seria 1, pp. 65-115. (In Russian)

Kanaev L.A. Ob izmenchivosti svoistv snega [On the variability of snow properties]. *Trudy SARNIGMI* [*Proceed-*

горах // Тр. САРНИГМИ. 1977b. Вып. 32 (113). С. 40-54.

Chernouss P.A., Fedorenko Yu.V. Probabilistic evaluation of snow-slab stability on mountain slopes // Annals Glaciology. 1998. Vol. 26. P. 303-306. DOI: 10.3189/1998aog26-1-303-306

Chernous P., Barashev N., Fedorenko Yu. Spatial variability of snow characteristics and snow stability // Proceedings of “International Snow Science Workshop 2008” (September 21st – September 27th, 2008, Whistler, British Columbia, Canada). Whistler. 2008. P. 948-949

Chernous P., Fedorenko Yu., Barashev N. Spatial variability of some snow characteristics on a slope and interpretation of measurements for snow stability assessment // Proceedings of “International Snow Science Workshop 2006” (October 1 - 6, 2006, Telluride, CO). Telluride. 2006. P. 339-348

ings of Middle Asia Regional Research Hydrometeorological Institute], 1969, iss. 44 (59), pp. 25–42 (In Russian)

Kazakevich D.I. *Osnovy teorii sluchainykh funktsii i ee primenenie v gidrometeorologii [Fundamentals of the theory of random functions and its application in hydrometeorology]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1977. 320 p. (In Russian)

Moskalev Yu.D., Kanaev L.A. *Prakticheskoe posobie po prognozirovaniyu lavinnoi opasnosti [A practical guide for avalanche hazard forecasting]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1979. 200 p. (In Russian)

Solov'ev V.A., Yakhontova V.E. *Elementarnye metody obrabotki rezul'tatov izmerenii [Elementary methods for processing of measurement results]*. Leningrad, Publ. of Leningrad University, 1977. 73 p. (In Russian)

Voitkovskii K.F., Golubev V.N. Voitkovskii V.K. Prostranstvennaya izmenchivost' stroeniya i svoistv snezhnogo pokrova na sklonakh gor [The spatial variability of the structure and properties of the snow cover on the mountain slopes]. *Vestnik MGU. Seria V. Geografia [Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia]*, 1986, No 1, pp. 80-86. (In Russian)

Zhukovskii E.B., Kiseleva E.L., Mandel'shtam S.M. *Statisticheskii analiz sluchainykh protsessov [Statistical analysis of random processes]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978. 408 p. (In Russian)

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ

SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 556

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ. ЧАСТЬ 1

А.Ю. Виноградов[1,2], А.М. Догановский[3], В.А. Обязов[1]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, [3]Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. Статья начинает дискуссию на тему об обоснованности использования методов теории вероятности и математической статистики в гидрологических расчетах. Вся методология современных расчётов стока зиждется на статистической обработке рядов наблюдений. Эти методы указаны в регламентирующих документах (СП 33-101-2003) и, де-факто, являются обязательными к применению при выполнении расчетов для нужд строительного проектирования. Любые другие альтернативные ме-

EXISTING ISSUES OF HYDROLOGY CALCULATIONS. PART 1

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Arkady M. Doganovsky[3], Victor A. Obyazov[1]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia, [2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia, [3]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. The article begins a discussion on the validity of applying methods of probability theory and mathematical statistics in hydrology calculations. The methodology of river flow calculations nowadays is based on the statistical processing of observation datas. These methods are specified in prescriptive documents (such as SR 33-101-2003) and, in fact, are required for using in engineering calculations. Any other alternative methods are not advisable.

Виноградов А.Ю., Догановский А.М., Обязов В.А. Существующие проблемы гидрологических расчётов. Часть 1 // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 143-159. DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.004

тоды таковыми не являются. Однако опыт применения вероятностно-статистических методов в инженерно-гидрометеорологических изысканиях позволяет усомниться в правомерности такой постановки вопроса.

Вызывает сомнение применение к гидрологическим характеристикам, в частности расходу воды, понятия случайной величины. С точки зрения математика, выборка исходных данных, впоследствии используемых при решении статистической задачи, всегда получается в результате эксперимента, проводимого при неизменных условиях. Расход воды зависит от многих природных факторов, часть из которых постоянно меняется. Кроме того, зависимость от некоторых факторов почти функциональна. Например, выпадение осадков вызывает увеличение стока, а отсутствие – уменьшение. Другие факторы, наоборот, достаточно стабильны. Для каждого конкретного водосбора они не случайны и ведут себя вполне предсказуемо.

Представляется недостаточно аргументированной экстраполяция, например, максимальных расходов воды в область редкой обеспеченности. Погрешность измерений (определений) расхода воды в реке возрастает по мере его увеличения. Этому способствует практически невозможное измерение расхода при выходе воды на пойму, при ледоходе, карчеходе и другие. Применяемые в этих случаях методы измерения по экспертной оценке дают ошибку до 25%. Сами же "измеренные" максимальные расходы

However, our experience of using probabilistic-statistical methods in engineering-hydrometeorological surveys let us to doubt the propriety of such application.

It is questionable whether the concept of a random variable is applied to hydrological characteristics, in particular, to water consumption. In terms of mathematics, the sample input data subsequently used in solving statistical problem is the result of an experiment conducted under unaltered conditions. Water consumption depends on many natural factors, some of which are constantly changing. In addition, dependence on some factors is almost functional. For example, precipitation causes an increase of river flow, and their absence causes a decrease. Other factors, in contrast, are quite stable. For each catchment area, they are not random and behave predictably.

For example, extrapolation of the maximum water flow rate in the region of rare probability, seems insufficiently reasoned. The error of measurements (definitions) of water flow in the river increases as its value increases. This is facilitated by the almost impossible measurement of river flow when water enters the floodplain, while floating of ice, while timber drifting on rivers, etc. The measurement methods used in these cases give an error of up to 25% by experts

Alexey Yu. Vinogradov, Arkady M. Doganovsky, Victor A. Obyazov Existing issues of hydrology calculations. Part 1. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 143-159 (in Russian; abstract in English), DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.004

отличаются друг от друга на 5-10%. Таким образом, мы имеем не ранжированные значения нескольких наибольших расходов, а некий усредненный максимальный расход, имеющий регулярную повторяемость.

Как следствие, сделан вывод о недостаточной обоснованности применения математического аппарата вероятностно-статистического анализа в гидрологических расчётах.

Ключевые слова: вероятностные методы; гидрологические расчеты; речной сток; повторяемость экстремальных расходов; точность измерения максимальных расходов воды

assessment. Herewith water flows are differs by 5-10%. Thus, we do not have the ranked values of several of the highest water flow, but some average maximum flow with regular repeatability.

As a result, it was concluded that the use of probabilistic-statistical analysis in hydrological calculations is insufficiently justified.

Keywords: probabilistic methods; hydrology calculations; river flow; the frequency of occurrence of extreme water flow; accuracy of measuring maximum water flow

«Природа не делает скачков и не терпит беззакония, хаоса и случайности, … отклонения кажутся случайными и произвольными лишь для неопытного глаза, лишь для человека, не умеющего читать величайшую из книг – книгу природы...»

В.В. Докучаев

Введение

Одна из основных задач, которые ставит перед собой редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления» – это возрождение дискуссии в научном сообществе. Предлагаемая тема, как нам кажется, достойна всестороннего обсуждения.

С того дня, как нам предложили вести гидрологические расчёты единственным способом – с использованием методов теории вероятностей и математической статистики – прошло почти 80 лет. За прошедшие с тех пор годы было накоплено много данных, наработан богатый опыт их обработки, а также разработаны некоторые альтернативные методы и подходы к расчётам речного стока. Давайте последовательно рассматривать плюсы и минусы существующих и предлагаемых методов.

Приглашаем всех неравнодушных к обсуждению!

Мнение

Гидрология, как научно-техническая дисциплина, создавалась для обеспечения инженерно-строительной деятельности необходимыми расчётами расходов и уровней поверхностных вод суши. Исходя из этого, инженерные гидрологические расчёты представляют собой основной и важнейший раздел гидрологии.

Вся методология современных расчётов стока основана на статистической обработке рядов наблюдений. Основатели этого направления С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель считали, что «статистический анализ данных наблюдений за речным стоком является основным способом гидрологического обоснования при разработке водохозяйственных систем» [Крицкий, Менкель, 1981].

Они писали: «современная наука не располагает возможностями детерминированного прогнозирования речного стока на десятки лет вперёд... Вряд ли такое прогнозирование вообще когда-нибудь станет возможным... Статистические методы – единственный ... способ раскрыть закономерности, проявляющиеся в многолетних колебаниях стока» [Крицкий, Менкель, 1981].

Нам представляется, что дать реальный прогноз изменения речного стока для конкретной реки даже на год вперёд вряд ли возможно, используя только статистические методы. Давайте попробуем оценить правомерность их применения.

Традиционная гидрология, в том числе и в рамках существующего СП 33-101-2003[1], предлагает нам для определения количественной оценки гидрологических характеристик пользоваться «вероятностно-статистическими методами, которые являются основными методами анализа в гидрологических расчётах» [Владимиров, 1990].

Пункт 4.15[2] к гидрологическим характеристикам относит: расход воды Q, м^3/с; объём стока воды W, м^3; модуль стока воды q, м^3/с·км^2; слой стока воды h, мм; уровень воды H, см. Важнейшая и определяющая все остальные – расход воды. В дальнейшем, если не оговорено иное, под термином «гидрологические характеристики» будем понимать именно расход воды, причем, сделаем акцент на максимальных расходах.

Существующая методология основывается на простых положениях. Первое – сами понятия «надёжность» и «риск» имеют вероятностную природу. Второе – это постулат, что чем больше величина расхода воды, тем реже она проявляется.

[1] Свод правил по проектированию и строительству. СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик / ред. А.В. Рождественского. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
[2] Там же

В рамках такой методологии расчётный расход воды регламентируется вероятностью превышения такового для каждого вида строительства, устанавливаемой нормативными документами, утверждаемыми Госстроем России в зависимости от уровня ответственности сооружений (п. 4.8) [3]. Например, согласно СП 58.13330.2012 [4] каждому классу гидротехнических сооружений соответствует своя нормативная степень надёжности – вероятность того, что максимальный расход воды Q_p, соответствующий расчётному случаю P_0, не наступит в течение расчётного срока службы сооружения N:

$$p = \left(Q < Q_p; t \leq N\right) < P_0 \tag{1}$$

В математике вероятность понимается, как количественная оценка *возможности* наступления некоторого события. Какова вероятность наступления события (паводка с определённым расходом) в ближайший год или десятилетие?

«Расчёты годового стока и других его характеристик представляются в виде количественной оценки, отвечающие той или иной заданной обеспеченности или повторяемости – в среднем один раз в N лет без указания срока наступления расчётной величины» [Горошков, 1979].

«Значения характеристик стока для каждого года можно считать случайными и не зависящими друг от друга, поэтому не представляется возможным прогнозировать срок их появления, но можно оценить лишь вероятность их превышения более высокими значениями» [Федотов, 2010].

Что означает термин «заданная обеспеченность» или «повторяемость», например, 1% расхода с точки зрения гидролога? Он подразумевает, что в результате расчётов, мы получаем величину, имеющую размерность искомой гидрологической характеристики, и предполагаем, что в ближайшие сто лет она будет превышена не более одного раза. То есть, может быть превышена уже завтра.

С точки зрения теории вероятности, в практическом смысле необходимо получить вероятность того, что «аварийное» событие $A\{Q \geq Q_p\}$ произойдет за расчётный срок, то есть что событие A произойдет хоть раз за n лет. Пусть p – вероятность события в единичном испытании, а $q=1-p$ – вероятность обратного события $\bar{A}\{Q<Q_p\}$, представляющую частный

[3] Там же

[4] Свод правил по проектированию и строительству. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 М., 2012. 39 с.

случай выражения для вероятности того, что событие *A*, имеющее вероятность *p* произойдет ровно *k* раз в серии испытаний *n*:

$$P_n(k) = C_n^k p^k q^{n-k} \quad (2)$$

Тогда вероятность того, что событие (наш максимальный расход будет превышен) произойдёт в серии *n* независимых испытаний хотя бы один раз, можно определить как $1–q^n$, ибо обратное событие будет состоять в том, что сток НЕ будет превышен *n* раз.

Расчёт этой вероятности проведен по формуле Бернулли и представлен в таблице 1 [Виноградов, Никифоровский, 2014]:

$$P_n\{k \geq 1\} = 1 - q^n \quad (3)$$

Таблица 1. Величина вероятности превышения расхода заданной повторяемости

Table 1. The probability of exceeding the flow rate of a given periodicity

количество лет наблюдения	Вероятность превышения, %				
	0,01	0,05	0,1	1	5
5	0,05	0,25	0,50	4,90	22,62
10	0,10	0,50	1,00	9,56	40,13
25	0,25	1,24	2,47	22,22	72,26
50	0,50	2,47	4,88	39,50	92,31
80	0,80	3,92	7,69	55,25	98,35
100	1,00	4,88	9,52	63,40	99,41

Таким образом, за 100 лет: 5-процентный расход будет хотя бы раз превышен наверняка, 1-процентный – несколько больше половины, а 0,1-процентный – в 10% случаев; математическое понятие вероятности события не соответствует гидрологическому восприятию этого термина.

Рассмотрим, насколько понятие случайной величины применимо к гидрологическим характеристикам, в частности – расходу воды. «При осуществлении гидрологических расчётов используются методы статистического анализа случайных процессов» [Владимиров, 1990].

Что такое «случайный процесс» в гидрологическом понимании? «Многие гидрологические характеристики определяются огромным числом факторов, степень влияния каждого из которых учесть практически невозможно. При этом конкретное значение

характеристики есть результат случайного сочетания этих факторов. С учётом этого, сама исследуемая характеристика должна рассматриваться как случайная величина (или случайный процесс) и для её определения могут быть использованы методы теории вероятности и математической статистики» [Дружинин, Коноваленко, Хамьянова, 1967]. «Определение гидрологических характеристик основано на использовании уравнений, описывающих связь рассчитываемой характеристики с определяющими её факторами. Полностью учесть влияние всех факторов на гидрологическую характеристику невозможно в силу их многообразия и случайности влияния. Поэтому гидрологические связи не являются функциональными, а носят вероятностный характер, относятся к статистическим, и к ним могут быть применены методы статистического анализа» [Владимиров, 1990]. «Что касается появления в том или ином году тех или иных значений расхода ..., то их можно рассматривать как случайные» [Горошков, 1979].

Следовательно, наш измеренный максимальный расход – случайная величина.

Обратимся к определениям случайной величины.

«Случайной величиной называется поддающаяся измерению ... величина определённого физического смысла, значения которой подвержены некоторому неконтролируемому разбросу при повторных наблюдениях» [Айвазян, Енюков, Мешалкин, 1983].

Расход воды поддается измерению, имеет физический смысл и значения его подвержены разбросу. В данном случае подразумеваются многократные повторные измерения расхода воды при неизменных внешних условиях, а не измерения стока в условиях меняющихся природных факторов.

Математики случайной называют величину, которая в результате испытания примет одно и только одно числовое значение, зависящее от случайных факторов и заранее непредсказуемое.

Исходя из этого определения случайной величины, мы при каждом следующем измерении можем ожидать любого расхода воды. Однако, всем понятно, что если сегодня у реки средний расход 1 м^3/сек, то и завтра он будет таким же. Если только не пойдет ливень или не начнет таять снег. Значит, хотя бы часть факторов может быть предварительно учтена? Попробуем перечислить основные:

Первый – рельеф. Чем круче склоны водосбора, тем обильнее и быстрее пройдёт паводок. Чем глубже врез русла, тем большее количество подземных водоносных горизонтов будут дренированы рекой.

Второй – наличие на водосборе растительности и других регулирующих факторов. Чем гуще на водосборе лес, больше болот и озёр, тем более сглажена будет волна половодья.

Третий – состав почв и их водонасыщенность, аккумулирующая и фильтрационная способность.

И, наконец, четвертый фактор – осадки. Паводки возможны только при наличии осадков. Предварительно оценить, какой будет паводок на конкретной реке при выпадении того или иного ливня, вполне реально. Специалист, прикинув запасы снега на водосборе или интенсивность идущего ливня, может с хорошей точностью спрогнозировать грядущий максимальный расход конкретной реки.

Так в чём же случайность рассматриваемой характеристики? Получается, что предварительно оценить влияние основных ландшафтных и климатических факторов на сток вполне реально. Для каждого конкретного водосбора они не случайны, мало меняются во времени и ведут себя вполне предсказуемо. Следовательно, их влияние можно предварительно учесть. Поскольку случайными называются «величины, численное значение которых зависит от не поддающихся предварительному учёту случайных обстоятельств» [Гнеденко, 1968], то на поверку выходит, что мы имеем дело с *неслучайными* величинами и процессами?

Однако, как уже говорилось, «гидрологические характеристики определяются огромным числом факторов». Пускай каждый фактор имеет свою вероятность реализации, понимая её здесь в классическом смысле как отношение числа m несовместимых равновероятных элементарных событий, составляющих событие A, к числу всех возможных элементарных событий n:

$$p(A) = \frac{m}{n} \quad (4)$$

Тогда вероятность совместного наступления двух событий равна произведению их вероятностей [Гнеденко, 1968]. Пусть x – число влияющих факторов, в первой строке – вероятность одного фактора (таблица 2). В предположении, что факторы независимы и равнозначны, при вероятности по одному фактору 0,5 (равновероятны как проявление, так и отсутствие влияния фактора) и пяти факторах имеем вероятность «редкого» события – 0,03, что уже практически неосуществимо.

Таблица 2. Вероятность наступления события в случае воздействия нескольких независимых факторов.

Table 2. The probability of an event occurring in the event of exposure to several independent factors

Число факторов	Вероятность наступления события, %			
1	5	10	25	50
2	0,25	1	6,25	25
5	0,00003	0,001	0,098	3,125

Но, поскольку событие все равно происходит, можно сделать вывод – значимых факторов на так и много, а вероятность однозначного влияния этих факторов достаточно велика.

Итак, «...закономерности колебания характеристик стока свободных (незарегулированных) рек устойчивы в течение периодов, соизмеримых со столетиями» [Владимиров, 1990]. Следовательно, значения гидрологических характеристик не могут быть случайны в математическом понимании этого термина.

Второе условие применимости рассматриваемого математического аппарата.

«Что мы должны знать о случайной величине для того, чтобы иметь полноту сведений о ней, как о случайной? ...Прежде всего, мы должны знать *все* численные значения, которые она способна принимать» [Гнеденко, 1968]. При проведении наших расчётов, мы должны всегда иметь в виду, что все возможные результаты должны «быть указаны заранее и действительный исход будет одним из возможных» [Гнеденко, 1968].

В рамках существующей методологии гидрологических расчётов, не существует ответа на вопрос, в каких пределах изменяется гидрологическая величина в конкретном створе. Получив расчётный расход, соответствующий обеспеченности 0,1%, мы априори предполагаем, что по реке обязательно пройдет расход, соответствующий 0,01% и так далее обеспеченности. Ограничение максимальных значений функции распределения, по мнению С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, «беспредметно и схоластично». «Абсолютные верхняя и нижняя границы возможных значений стока не поддаются физическому определению. Этот интервал *логично* распространять на всю область положительных величин» [Крицкий, Менкель, 1981].

Очередное обязательное условие. «Знание возможного перечня возможных значений случайной величины не даёт о ней таких сведений, которые могли бы служить материалом для

практически необходимых оценок ... Необходимо *знать* вероятности различных возможных значений интересующей нас случайной величины» [Гнеденко, 1968].

«Для исчерпывающего задания случайной величины недостаточно описать множество теоретически возможных значений анализируемой случайной величины, … необходимо установить ... правило ... распределения вероятностей случайной величины» [Айвазян, Енюков, Мешалкин, 1983].

В задачах теории вероятностей предполагается, что вероятностная модель изучаемого явления полностью определена, и теория вероятностей занимается разработкой методов нахождения вероятностей различных сложных событий в рамках данной вероятностной модели. По этим вероятностям мы можем в дальнейшем строить научно обоснованные прогнозы.

В нашем же случае, подбор соответствующей функции распределения вероятностей и определение по ней расчётных гидрологических характеристик (п. 5.1) [5] является результатом решения задачи, а не её обязательным условием.

Итак, по всем перечисленным признакам использование теории вероятности в гидрологических расчётах не имеет достаточного обоснования.

Теперь непосредственно о статистической обработке рядов наблюдений. Математическая статистика решает задачи, обратные теории вероятностей [Ивченко, Медведев, 2010]. В рамках математической статистики, у нас должна появиться возможность оценки функции распределения нашей выборки. Для этого мы должны провести оценку различных параметров распределений наблюдаемых случайных величин, и проверку различных гипотез о свойствах этих величин (их распределений) и, тем самым, подобрать подходящую вероятностную модель изучаемого эксперимента [Владимиров, 1990].

«Выявление закономерностей, свойственных совокупности явлений, формирующихся как следствие многофакторных связей (метеорологических, физико-географических), возможно лишь статистическими методами» [Рождественский, Чеботарев, 1974].

«При проведении гидрологических расчётов приходится оперировать большим количеством исходных данных ..., которые образуют статистические ряды. Применение вероятностно-статистических методов анализа и расчётов позволяет получить количественное значение гидрологических характеристик» [Владимиров, 1990].

[5] СП 33-101-2003

Задача решается следующим образом. Для последующей обработки ряд годовых максимальных измеренных расходов воды ранжируется (как принято в гидрологии – от большего значения к меньшему), для каждого члена ряда определяется его повторяемость. Далее подбирается теоретическая кривая распределения, наилучшим образом соответствующая эмпирическим точкам. «Кривые распределения могут иметь разную форму, но обычно используется один из трёх типов: нормальная, Пирсона, Крицкого-Менкеля» [Владимиров, 1990]. В результате, вопрос получения теоретически возможных максимальных расходов в области редкой повторяемости, решается автоматически.

Понятно, что «экстраполяция в область редкой «обеспеченности» ничем не обоснована, результаты, в зависимости от выбранной кривой, могут различаться в десятки раз» [Найденов, Кожевникова, 2003]. Тот или иной вид хвоста теоретической кривой распределения целиком зависит от характера распределения нескольких самых экстремальных расходов за весь период наблюдений.

Анализ частоты повторяемости экстремальных паводков 50 малых и средних рек Северо-Запада России [Ресурсы поверхностных вод СССР] показывает, что на протяжении 86 лет (1881-1966 годы) наблюдалось 19 многоводных лет (таблица 3). В подавляющем большинстве случаев, измеренные максимумы отличаются от последующих ранжированных значений максимальных расходов в среднем на 5-10%, что укладывается в точность измерения. Например, на незарегулированной реке Мста в районе поста ниже устья р. Увери (площадь водосбора 12,5 тыс км^2) – в область погрешности измерений максимальных расходов попали 22 наибольших значения (рисунок 1)! Таким образом, мы имеем не ранжированные значения нескольких наибольших расходов, а некий усредненный максимальный расход, имеющий регулярную повторяемость. Если у нас есть столетний ряд, то такой расход на самом деле фиксируется от 10 до 20 раз.

На практике наши ряды намного короче, большинство наблюдений проходило в 50-е-60-е годы, чем объясняется увеличение количества измеренных расходов в этот период. Пробелы во втором и пятом десятилетиях XX века объясняются двумя мировыми войнами.

На основании этого можно сделать вывод, что благоприятная для экстремальных паводков (половодья) ситуация складывается не реже, чем раз в пять-семь лет. Различие в расходах воды у всех этих паводков укладывается в точность измерения. Вероятность наступления такого события каждый последующий год – $0{,}1 \div 0{,}2$.

Таким образом, даже «измеренные» экстремальные расходы не позволяют построить однозначную кривую распределения. На практике мы имеем поле точек вокруг некоторого

среднего максимума, имеющего повторяемость на порядок бо́льшую, нежели предполагалось авторами рассматриваемого метода.

Таблица 3. Повторяемость максимальных паводков некоторых рек Северо-Запада за период 1881-1966 годов.

Table 3. The frequency of maximum floods of some rivers of the North-West for the period 1881-1966.

площадь, км^2	6230	1130	2070	12500	14700	6820	5990
река-пункт / годы	Сясь-Яхново	Воложба-Воложба	Тихвинка-Горелуха	Мста-устье р. Увери	Ло-вать-Холм	Шелонь-Заполье	Луга-Толма-чево
1881			(446)	(774)			
1899			247	(784)			
1901			307	(779)			
1905			261	(784)			
1911	963		367	(838)			
1915	715		233	(853)	1310		
1916					1470		
1917	774		276		1480		594
1918					1400		536
1919	819		301		1400		
1922	708						578
1924	780						
1926	928		324	728		1060	(800)
1931	846		252	735	(2130)	1340	564
1935				821			
1936				732			
1943		184	254				
1946	849	190	305				
1948					1560		
1955	692	185	244	696	1400	852	
1956						1300	585
1957							
1959		179		646	1420		
1961							

площадь, км^2	6230	1130	2070	12500	14700	6820	5990
река-пункт / годы	Сясь-Яхново	Воложба-Воложба	Тихвинка-Горелуха	Мста-устье р. Увери	Ло-вать-Холм	Шелонь-Заполье	Луга-Толма-чево
1962	727		290		1720		
1966	788	191	259	713	1120	872	526
среднее из 5 максимальных, м^3/с	881	186	321	816	1672	1085	624
диапазон погрешности измерений максимального расхода, м^3/с	793-969	167-204	289-353	734-898	1505-1839	976-1193	562-687
погрешность выхода за диапазон, %	0	0	14	0	14	11	14

Примечание. В скобках указаны значения, величина которых вызывает сомнения.

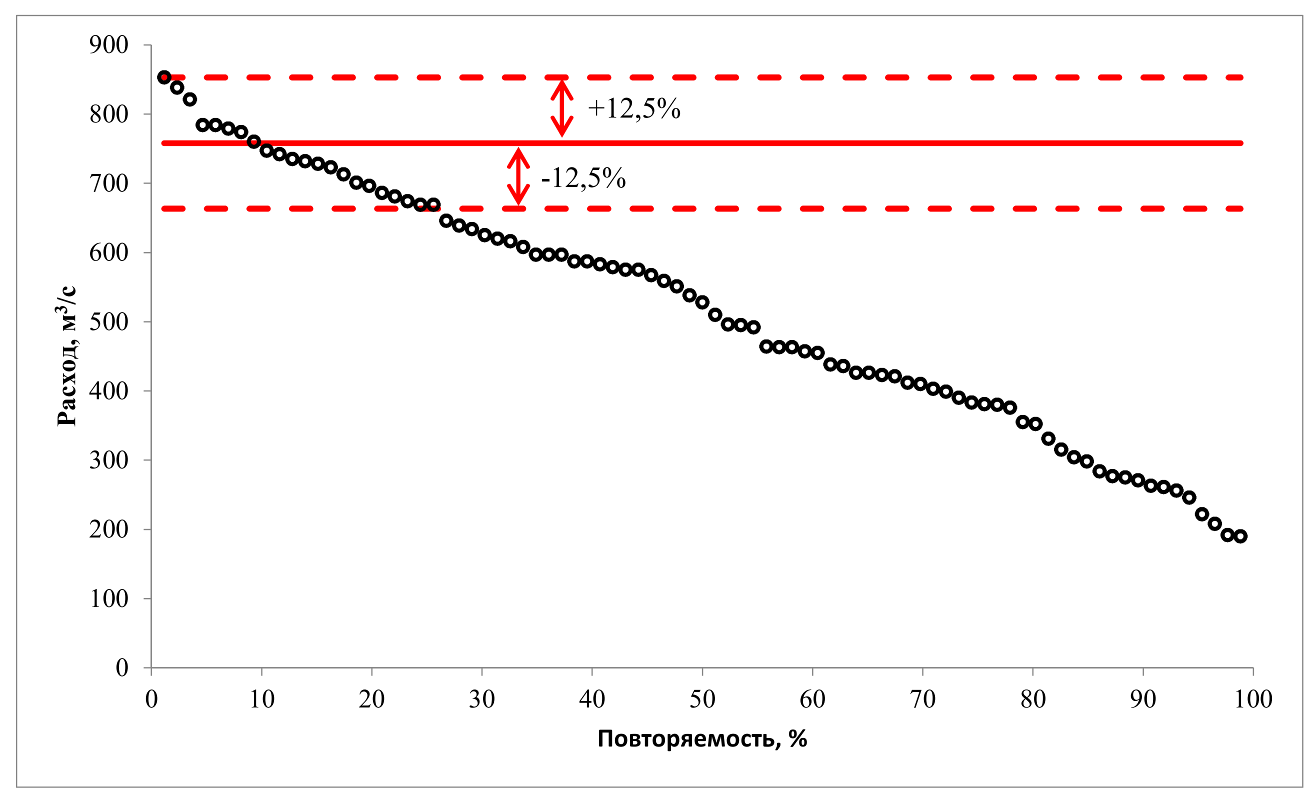


Рисунок 1. Диапазон погрешности измерений максимальных расходов на примере река Мста – устье реки Увери.

Figure 1. The range of measurement error of maximum flow rates by the example of the Msta River - the estuary of the Uvery River.

Погрешность ***оценки*** значений максимальных расходов весеннего половодья, осложнённого ледоходом и выходом воды на пойму экспертно оценена нами в 25%. Суммарная относительная погрешность ***измерения*** расхода воды при основном способе составляет 10%[6]. Надо иметь в виду, что на самом деле измерений максимальных расходов практически не производится. Например, на 10 тысяч годопунктов в Забайкальском управлении гидрометслужбы максимальный расход дождевых паводков непосредственно был измерен всего 5 раз, т.е не более 0,05% случаев от приведенных в ежегодниках. В период ледохода измерения вообще не производятся! Оценка экстремального расхода на конкретную дату производится путем экстраполяции кривой $Q = f(H)$. Точность определения уровня в период половодья сама по себе очень мала, поскольку ледоход сопровождают заторные явления, ход большой воды часто сопровождается карчеходом и местным подпором.

Наши сомнения по поводу адекватности самой идеи экстраполяции ряда измеренных экстремальных расходов в область редкой повторяемости проиллюстрируем еще следующей мыслью.

Предположим, мы имеем ряд максимальных расходов воды продолжительностью 1000 лет. Первые девять значений ранжированного ряда будут иметь обеспеченность от 0,1 до 0,9%. Поскольку обычно продолжительность наблюдений за стоком не превышает 100 лет, то условно разделим 1000-летний ряд на десять 100-летних. В каждом таком укороченном ряду производим процедуру ранжирования и расчёта обеспеченностей членов ряда. Ожидаемо, в этих десяти рядах не может быть расходов 0,1-0,9%-ной обеспеченности. На практике, имея дело с короткими рядами, мы полагаем, как правило, что расходы такой обеспеченности находятся за пределами нашего ряда. Но, исходя из предыдущих рассуждений, мы знаем, что они с 90%-ной вероятностью должны попадать в наш ряд! Подобную логику можно распространить на 0,01% повторяемость и далее, откуда следует, что используемая на сегодняшний день официальная методика, узаконенная соответствующим СП 33-101-2003 – по меньшей мере, сомнительна.

Существующая методика гидрологических расчетов имеет и свои несомненные плюсы. Как нам представляется, их всего три.

Первый – методика на сегодняшний день отработана, принята сообществом проектировщиков и изыскателей, прописана во всех регламентирующих документах.

---

[6] Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость - площадь». МИ 1759-87. М.: Издательство стандартов, 1987

Второй – методика снимает всякую персональную ответственность с расчетчика и проектировщика за неправильно принятые решения. Любая ошибка может быть списана на «запроектный» паводок.

Третий – при строительстве объектов низкого уровня ответственности (при расчетах 10 – 2% повторяемости) на изученных (!) реках, методика дает более-менее адекватные расчетные значения.

При этом мы еще раз подчеркиваем, данная методика имеет право на жизнь при расчетах паводков более редкой обеспеченности ***только*** для изученных рек, то есть имеющих ряды наблюдений на них 5 лет и более.

Выводы.

1. Применение математического аппарата вероятностно-статистического анализа в гидрологических расчётах недостаточно обосновано.
2. Численное значение «вероятности превышения» не соответствует истинной вероятности с точки зрения теории вероятностей.
3. Ранжирование максимальных расходов в области редкой повторяемости с целью подбора теоретической кривой распределения невозможно, ввиду превышения величины погрешности измерений над различием между собой соседних членов выборки.
4. Не лимитированное увеличение значений экстремальных расходов при сроках жизни реки, сравнимых с геологическими периодами, бессмысленно и неправомерно. Во-первых, таких рек не существует. Спустя тысячелетия на этом же месте могут появиться новые реки, но это будут уже другие реки. Во-вторых, водность реки всегда зависит от количества выпавших осадков. Осадки образуются из находящегося в атмосфере водяного пара, количество которого, в свою очередь, регламентируется конечным и строго определенным значением солнечной радиации, поступившей на поверхность планеты.
5. При расчетах паводков 10 – 2% повторяемости для изученных рек (с рядами наблюдений на них 5 лет и более) данная методика имеет право на жизнь.

Литература

Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное

References

Aivazyan S.A., Yenyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh: Spravochnoe izd. [Applies statistics: Bases of modelling and initial data processing: reference*

изд. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.

Виноградов А.Ю. Никифоровский А.А. К вопросу о применимости статистических методов в расчетах максимального стока малых рек // Сборник докладов III Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (г. Южно-Сахалинск, 22-26 сентября 2014 г.) / Отв. редактор Н.А. Казаков. Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 2014. С. 242-246

Владимиров А.М. Гидрологические расчёты. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 365 с.

Гнеденко Б.В. Беседы о математической статистике. М.: Наука, 1968. 64 с.

Горошков И.Ф. Гидрологические расчёты. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 433 с.

Дружинин И.П., Коноваленко З.П., Хамьянова Н.В. Вековые и внутривековые колебания стока рек Азиатской части СССР // Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета / Под ред.

edition]. Moscow, Publ. Finansy i statistika, 1983. 471 p. (In Russian).

Gnedenko B.V. *Besedy o matematicheskoi statistike [Conversations about mathematical statistics]*. Moscow, Publ. Nauka, 1968. 64 p. (In Russian).

Goroshkov I.F. *Gidrologicheskie raschety [Hydrology calculations]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1979. 433 p. (In Russian).

Druzhinin I.P., Konovalenko Z.P., Kham'yanova N.V. Vekovye i vnutrivekovye kolebaniya stoka rek Aziatskoi chasti SSSR [Centuries-old and intra-century fluctuations in river flow in the Asian part of the USSR]. In Bykov V.D. (ed.) *Mnogoletnie kolebaniya stoka i veroyatnostnye metody ego rascheta [Long-term flow fluctuations and probabilistic methods for its calculation]*. Moscow, Publ. MGU, 1967, pp. 60-66. (In Russian).

Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedenie v matematicheskuyu statistiku: uchebnik [Introduction to Mathematical Statistics]*. Moscow, URSS, 2010. 600 p. (In Russian).

Fedotov G.A. *Izyskaniya i proektirovanie mostovykh perekhodov: uchebnoe posobie dlya studentov uchrezhdenii vysshego professional'nogo obrazovaniya [Researches and design of bridge crossings]*. Moscow, Publ. Akademiya, 2010. 304 p. (In Russian).

Kritskii S.N., Menkel' M.F. *Gidrologicheskie osnovy upravleniya rechnym stokom [Hydrological basics of river flow management]*. Moscow, Publ. Nauka, 1981. 257 p. (In Russian).

Naidenov V. I., Kozhevnikova I. A. Pochemu tak chasto proiskhodyat navodneniya [Why are floods so frequent?].

В.Д. Быкова. М.: Изд. МГУ, 1967. С. 60-66.

Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику: учебник. М.: Из-во ЛКИ, 2010. 600 с.

Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981. 257 с.

Найденов В.И., Кожевникова И.А. Почему так часто происходят наводнения // Природа. 2003. № 9 (1057). С. 12–20.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Т.2: Карелия и Северо-Запад. Часть 2. Приложения / Под ред. В.Е. Водогрецкого. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 278 с.

Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л: Гидрометеоиздат, 1974. 424 с.

Федотов Г.А. Изыскания и проектирование мостовых переходов: учебное пособие для студентов учреждений высшего профессионального образования. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.

Priroda [Nature], 2003, no. 9 (1057), pp. 12–20. (In Russian; abstract in English).

Rozhdestvenskii A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii [Statistical methods in hydrology]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1974. 424 p. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov A.Yu. Nikiforovskii A.A. K voprosu o primenimosti statisticheskikh metodov v raschetakh maksimal'nogo stoka malykh rek [On the applicability of statistical methods in the calculation of maximum flow of small rivers]. In Kazakov N.N. (ed.), *Sbornik dokladov Tret'ei Mezhdunarodnoi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita» (g. Yuzhno-Sakhalinsk, 22-26 sentyabrya 2014 g.) [III International Conference "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Yuzhno-Sakhalinsk, September 22-26, 2014)]*, Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. of Sakhalinskii filial Dal'nevostochnyi geologicheskii institut DVO RAN, 2014, pp. 242-246. (In Russian; abstract in English).

Vladimirov A.M. *Gidrologicheskie raschety [Hydrology calculations]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1990. 365 p. (In Russian; abstract in English).

Vodogretskiy V.E. (ed.) *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 vol. Vol.2: Kareliya i Severo-Zapad. Chast' 2. Prilozheniya. [Surface water resources of the USSR: in 20 vol. Vol. 2: Karelia and North-West. Part 2. Applications]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 278 p. (In Russian).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научный журнал «Гидросфера. Опасные процессы и явления» принимаются статьи на русском и английском языках в соответствии с основными тематическими разделами:

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли.
2. Опасные процессы и явления в гидросфере Земли.
3. Эволюция гидросферы Земли.
4. Экологические проблемы и опасности в гидросфере Земли.
5. Методология и методика исследований.
6. Научные дискуссии.
7. Хроника.

Плата за публикации статей не взымается. Гонорар авторам не выплачивается. Все статьи после формирования выпуска размещаются на сайте журнала в свободном доступе.

Общие требования к оформлению статьи:

- формат **.doc** или **.docx**; все поля страницы – по 2 см;
- шрифт Times New Roman, размер – 12 pt;
- междустрочный интервал – полуторный, переносы в словах не допускаются;
- абзацный отступ – 1,5 см, выравнивание текста – по ширине (за исключением титульной страницы, формул, сносок, рисунков и таблиц).

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи (регистр как в предложении, выравнивание по центру) не более 14 слов;
- инициалы и фамилия автора (авторов) (выравнивание по центру);
- полное название организации, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);
- e-mail контактного автора (выравнивание по центру);
- аннотация объемом 230-250 слов, которая должна включать актуальность темы исследования, постановку проблемы, цели исследования, методы исследования, результаты и ключевые выводы;
- ключевые слова – 6-10 слов, предельно отражающих предмет исследования.

Основной текст статьи.

При подготовке статьи редакция настоятельно рекомендует придерживаться формата **IMRAD**, подразумевающего структурирование статьи на следующие элементы:

- введение (Introduction), содержащпй актуальность исследования, обзор литературы, постановку проблемы, формулирование целей и задач исследования;
- методы (Methods), содержащий описание методики (методов) и схем экспериментов/наблюдений, материалов, приборов, оборудования и условий экспериментов/наблюдений;
- результаты (Results) – фактические результаты исследования и их интерпретация;
- обсуждение (Discussion) – краткие итоги разделов статьи без дословного повторения.

Таблицы и рисунки оформляются без абзацного отступа с выравниванием по центру, отделяются пустыми строками от основного текста. Все рисунки должны быть максимального качества. В таблицах допускается использование одинарного междустрочного интервала, шрифта меньшего размера (не менее 10 pt). Каждая таблица и рисунок должны иметь номер (используются арабские цифры) и название. Все подписи к таблицам и рисункам должны содержать источники информации (за исключением случаев, когда они созданы автором статьи).

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

Десятичные числа набираются через запятую (например, 1,25).

Аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если таких элементов много, статью можно дополнить списком сокращений с расшифровкой.

Формулы должны быть вставлены как объект Microsoft Equation или набраны в редакторе формуле Word, располагаться по центру страницы без абзацного отступа, сопровождаться сквозной нумерацией (по правому краю), а также иметь экспликацию (расшифровку обозначений при первом их упоминании с указанием единиц измерения).

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Отсылка на затекстовые библиографические ссылки приводится по тексту статьи в квадратных скобках путем упоминания всех авторов (при отсылке к источнику с 1-3 авторами), либо первого автора и слов «и др.» («et al.») (при отсылке к источнику с 4 и более авторами) и года издания. Ссылки на несколько публикаций одного автора за один год помечаются добавлением буквы к году издания. В случае отсылки на несколько источников, они приводятся в хронологическом порядке и разделяются точкой с запятой.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Ссылка на книгу: *Фамилия И.О.* Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности (например, редактор). Место издания (город): Издательство, год. Количество страниц в книге. DOI:

Ссылки на диссертацию или автореферат: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

Ссылки на статью в книге: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на статью в периодическом издании: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на материалы в сборнике конференции: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие сборника конференции: Сведения, относящиеся к заглавию сборника (место и даты проведения конференции). Место издания (город): Издательство, год. Том. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на электронный источник: *Фамилия И.О.* Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: 01.01.2013).

В затекстовые библиографические ссылки включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов, материалы конференций, разделы книг и книги). Если необходимо сослаться на нормативный документ либо на статью в газете, текст на сайте или в блоге, следует поместить информацию об источнике в сноску по основному тексту статьи. **Сноски** оформляются сквозной нумерацией по всему документу арабскими цифрами. В сносках помимо источников может быть другая дополнительная информация. Текст в сносках оформляется без абзацного отступа, выравнивается по ширине, размер шрифта – 10 pt.

Кроме того, обязательно подается **авторская справка**, содержащая информацию обо всех авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученые степень и звания; место работы с указанием должности; контактный телефон; e-mail; авторские индексы.

На **английском языке** в обязательном порядке приводятся: титульная страница; названия таблиц и рисунков; благодарности (при наличии); литература (содержащая, как транслитерацию, так и перевод на английский язык); авторская справка.

При этом англоязычный вариант аннотации (**Abstract**) должен быть информативным (не содержать общих слов); оригинальным (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированным (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычными» (написаны качественным английским языком); компактным (укладываться в объем до 300 слов).

Подробные правила оформления статьей приведены на сайте журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»: http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

AUTHOR GUIDELINES

Articles in Russian and English accepted at the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena” in accordance with the main sections:

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes and phenomena in the hydrosphere of the Earth
3. The evolution of the Earth's hydrosphere
4. Ecological problems and hazards in the hydrosphere of the Earth.
5. Methodology and research methods
6. Scientific discussions
7. Chronicles

There is no fee for publishing articles. The authors are not paid a fee.

All articles after the formation of the issue are posted on the journal’s website in the public domain. Materials published in journal are freely available and posted on the journal website.

The general format requirements for articles to be published:

- file format .doc or .docx; fields 2 cm on the perimeter of the page;
- font Times New Roman, the main font size – 12 pt;
- line spacing – 1,5, the use of automatic hyphenation in words is not permitted;
- indent – 1,5 cm, text alignment on the page width (except for the title page, formulas, links, figures and tables).

The title page should contain the following elements:

- title of the article (register as in the sentence, alignment in the centre) no more than 14 words;
- author (s)’ name (alignment in the centre);
- organization affiliation, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- abstract up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
- keywords – 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

Introduction – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

Methods – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

Results – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

Discussion – What might the answer imply and why does it matter? How does it fit in with what other researchers have found? What are the perspectives for future research?

Tables and figures should be centered on page without indentation, separated from the main text by empty lines. All figuries should be in highest quality. There are allowed of using a single line spacing, and a smaller font (no less 10 pt) in tables. Each table and figure should have a number and a title. All signatures to tables and figures should contain sources of information (except when they are created by the author of the curent article).

Units of measurement in the text of the article are indicated in the international system of units.

Decimal numbers are comma-separated (e.g. 1,25).

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter. If there are a lot of abbreviations, the article can be supplemented by a section with a list of abbreviations with decryption.

For equations use a Microsoft Equation object or Word equation editor, they should be located in the center of the page without indentation and accompanied by continuous numbering (on the right edge). All equations must have an explication (defining of symbols at the first mention of them with units measurements).

If it necessary **Acknowledgments** of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. Footnotes to the text are numbered consecutively.

Cite references in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

References list should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should be mentioned in the footnotes. Reference list should be alphabetized by the last names of the first author. If you use several references of author

Some formats for references list:

Book reference: Author A.A. *Title of book*. City, Publisher, year. 100 p. DOI:

Book chapter reference: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), *Title of book.* City, Publisher, year, pp. 1-20. DOI:

Dissertation reference: Author A.A. *Title of thesis. Thesis type.* City, year. 100 p. DOI:

Jornal article reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49-53. DOI:

Conference Proceedings reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Conference Proceedings (date and place of the conference)*, City, Publisher, 2005, vol. 1, pp. 49-53. DOI:

Online document reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol.10, no. 2, pp. 49-53. Available at: http://example.com/example.

For the detailed information about the author(s), please at the end of article give us some additional information:

full names of author(s);
academic degree and title;
organization affiliation with full address (including Post Code);
position in organization;
contact telefon (for all authors);
contact e-mail (for all authors);
scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

Detailed rules for articles will be given on the website of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena”: http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements

Научное издание

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ.

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA (GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: М.М. Кадацкая

На обложках фото С.В. Рыбальченко и рисунки Н.А. Казакова

Подписано в печать 10.12.2019. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская
Усл. печ. л. 19,2. Тираж 80 экз. Заказ № 5229

Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект»
Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений:
199155 Санкт-Петербург, а/я 136

Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в издательстве «Лема»
Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28

